



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA CARBONATAÇÃO EM  
CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO**

Eduardo Scheeren

Lajeado, junho de 2020

Eduardo Scheeren

## **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA CARBONATAÇÃO EM CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO**

Monografia apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Dra. Débora Pedroso Righi.

Lajeado, junho de 2020

Eduardo Scheeren

## **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA CARBONATAÇÃO EM CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO**

A banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, na linha de formação específica em Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Profa. Dra. Débora Pedroso Righi - Orientadora.  
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Prof. Ms. Douglas Ferreira Velho.  
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Sr. Kassio Stein - Convidado.  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul -  
UFRGS.

Lajeado, 23 de julho de 2020

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha amada companheira Diana por compreender a demanda envolvida no presente projeto, bem como por auxiliar na realização das atividades. Com sua motivação e compreensão contribuiu para que este momento convirja em uma marca em minha vida. Um verdadeiro ser de luz em minha jornada.

Aos meus pais que mesmo distantes fisicamente sempre estiveram em meu coração, e me guiaram pelos obstáculos da vida e dando-me forças para superá-los. Aos meus avós Irene e Hélio (*in memoriam*), que com sua simplicidade e imenso amor me propiciaram a melhor criação que se pode desejar, ensinando-me os valores da família e da simplicidade. Sei que você meu avô não está mais neste plano, mas de onde estiver sei que está orgulhoso, que o seu herdeiro das dívidas atingiu a este objetivo.

À minha orientadora, Professora Débora Pedroso Righi, por acreditar e depositar plena confiança em minha capacidade de cumprir com esta missão, bem como motivar aos meus semelhantes com sua paixão pela pesquisa e pelos desafios que implica. Sem sua participação não teria se concretizado o presente trabalho, e eu também não teria despertado para esta nova realidade em minha jornada, o trabalho científico.

Ao meus tios e tias que participaram de minha orientação e me auxiliaram das mais diversas maneiras, formando meu caráter e minhas instruções.

Aos meus amigos e colegas que entendiam que a jornada de trabalho e estudos era intensa, e muitas vezes não propiciava tantos momentos em conjunto quanto se desejava.

Aos profissionais do LATEC da Univates, que mediante a restrições originadas da crise de saúde propiciada pelo COVID-19, sempre demonstraram atenção e forneceram-me apoio, na medida do possível, para realização do trabalho mediante tal cenário.

Ao pai celestial que tornou possível esta realização e permitiu que o destino me presenteara com pessoas incríveis que cruzaram meu caminho, me ensinando e me permitindo ensiná-las de alguma maneira.

Acredito, plenamente, que em cada ser origina-se uma forma de energia capaz de tornar o mundo um lugar digno de ser o melhor presente que o amanhã pode nos dar, e tenho a certeza que esta energia, de cada pessoa que já passou em minha vida, contribuiu para que o hoje seja considerado um presente para mim.

## RESUMO

O concreto é um dos principais materiais empregados nas estruturas das edificações, e portanto, faz-se necessário entender quais fenômenos de degradação podem ocorrer, para garantir a integridade e durabilidade dos elementos estruturais. Um dos agentes agressivos que acomete as estruturas de concreto é o dióxido de carbono, que é encontrado em diversos locais, em concentrações distintas, mas que mesmo em baixas quantidades promovem a redução da alcalinidade dos produtos originados da hidratação da pasta de cimento. Esta alcalinidade é a principal proteção da armadura dentro do concreto. Ainda que o mecanismo que carbonatação seja um processo simples, a velocidade com que ocorre é motivo de avaliação, pois em concentrações normais esta ocorre lentamente, sendo necessário realização de ensaios acelerados para entender como este processo ocorre. O presente trabalho objetiva construir um protótipo de câmara de carbonatação acelerada com materiais alternativos e que obtenha as concentrações de  $\text{CO}_2$  a partir de reações de dupla-troca. Objetiva-se empregar o referido protótipo para avaliar o comportamento que a adição de microfibras de polipropileno promove na resistência do material à penetração da carbonatação. Efetuou-se a dosagem pelo método ABCP, e foram moldados 4 traços de concreto de mesma matriz, 1:1,5:3, com relação a/c 0,55, variando apenas as variações de fibras em  $900\text{g/m}^3$ ,  $4,5\text{kg/m}^3$  e  $9\text{kg/m}^3$ , correspondentes a 0,1%, 0,5% e 1%, respectivamente. Após a realização dos ensaios de carbonatação obtiveram-se resultados satisfatórios, e estes foram relacionados com os resultados encontrados para resistência e para índice de vazios. As variações das profundidades de carbonatação médias entre os traços foram pequenas, mas o traço com baixas adições demonstrou-se mais promissor, mantendo valores adequados de trabalhabilidade, de resistência à compressão, de resistência à carbonatação e de variação resistência em relação aos índice de vazios.

**Palavras-chave:** concreto, fibras, carbonatação, protótipo.

## **ABSTRACT**

Concrete is one of the main materials used in building structures, and therefore, it is necessary to understand which degradation phenomena can occur, to guarantee the integrity and durability of the structural elements. One of the aggressive agents that affect concrete structures is carbon dioxide, which is found in different places, and in different concentrations, but which even in low quantities promotes the reduction of the alkalinity of products originated from the cement paste hydration. This alkalinity is the main protection of the reinforcement within the concrete. Although the carbonation mechanism is a simple process, the speed with which it occurs is a reason for evaluation, because in normal concentrations it occurs slowly, requiring accelerated tests to understand how this process occurs. The present work aims to build a prototype of an accelerated carbonation chamber with alternative materials that obtains CO<sub>2</sub> concentrations from double-exchange reactions. The objective is to employ this prototype to evaluate the behavior that the addition of polypropylene microfibers promotes in the material's penetration of carbonation resistance. Dosing was carried out using the ABCP method, and 4 concrete strokes from the same matrix were molded, 1:1,5: 3, with water/cement ratio of 0.55, varying only the fiber variations in 900g/m<sup>3</sup>, 4.5kg/m<sup>3</sup>, and 9kg/m<sup>3</sup>, corresponding to 0.1%, 0.5%, and 1%, respectively. After the carbonation tests were carried out, satisfactory results were obtained, and these were related to the results found for resistance and voids index. The variations in the average carbonation depths between the mixes were small, but the mix with low additions proved to be more promising, maintaining adequate values of workability, compressive strength, resistance to carbonation, and variation resistance about the voids index.

**Keywords:** concrete, fibers, carbonation, prototype.

## **LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

### **LISTA DE FIGURAS**

Figura 01 - Relação desempenho-tempo. . . . .	20
Figura 02 - Relação durabilidade-desempenho. . . . .	21
Figura 03 - Relação entre coeficiente de permeabilidade e relação a/c. . . . .	24
Figura 04 - Mecanismo de corrosão da armadura . . . . .	31
Figura 05 - Relação entre o desempenho e a vida útil da edificação. . . . .	33
Figura 06 - Velocidade da retração em função da concentração de dióxido de carbono. . . . .	46
Figura 07 - Carbonatação e a retração em função da umidade relativa do ar. . . . .	46
Figura 08 - Fissuras por retração em estrutura de concreto sem adição de fibras (A). Ausência de fissuras por retração em estrutura de concreto com adição de fibras de polipropileno (B). . . . .	47
Figura 09 - Mecanismo de exsudação da água em concreto convencional (A). Mecanismo de combate à exsudação da água em concreto com adição de fibras de polipropileno (B). . . . .	48
Figura 10 - Fluxograma da realização das atividades de metodologia. . . . .	50
Figura 11 - Areia média utilizada na dosagem. . . . .	52
Figura 12 - Brita 1 utilizada na dosagem. . . . .	54
Figura 13 - Fibra de PP monofilamento. . . . .	56
Figura 14 - Dosagem do traço base para confecção dos corpos de prova. . . . .	58
Figura 15 - Separação das fibras e colocação das mesma em cada traço. . . . .	59
Figura 16 - Realização do slump test. . . . .	60

Figura 17 - (A) Croqui da disposição dos corpos de prova na parte superior do protótipo; (B) Croqui da disposição dos corpos de prova na parte superior do protótipo. . . . .	63
Figura 18 - Croqui tridimensional do protótipo. . . . .	64
Figura 19 - Estrutura metálica do protótipo. . . . .	65
Figura 20 - Fixação dos vidros de vedação com uso de silicone. . . . .	66
Figura 21 - Croqui das chapas de vidro recozido utilizadas no protótipo. . . . .	66
Figura 22 - Croqui das chapas de vidro temperado utilizadas no protótipo. . . . .	67
Figura 23 - Mecanismo de desumidificação (A). Croqui do mecanismo de desumidificação do protótipo (B). Detalhe interno ao cano PVC de 100mm, com tela de nylon para reter a sílica ativa (C). . . . .	69
Figura 24 - Sistema de reação para obtenção de CO <sub>2</sub> . . . . .	70
Figura 25 - Protótipo com todos equipamentos de controle instalados. . . . .	71
Figura 26 - Bomba pneumática utilizada para pressurização da câmara. . . . .	72
Figura 27 - Pintura das laterais dos corpos de prova. . . . .	74
Figura 28 - Pesagem dos Reagentes. . . . .	75
Figura 29 - Reação fenolftaleína com pH alcalino e condicionantes de análise. . . . .	78
Figura 30 - NaCl em sedimentação. . . . .	89
Figura 31 - Indicação pH traço 0 amostra a (A). Indicação pH traço 0 amostra b (B). Indicação pH traço 0 amostra c (C). . . . .	90
Figura 32 - Indicação pH traço 1 amostra a (A). Indicação pH traço 1 amostra b (B). Indicação pH traço 1 amostra c (C). . . . .	90
Figura 33 - Indicação pH traço 2 amostra a (A). Indicação pH traço 2 amostra b (B). Indicação pH traço 2 amostra c (C). . . . .	91
Figura 34 - Indicação pH traço 3 amostra a (A). Indicação pH traço 3 amostra b (B). Indicação pH traço 3 amostra c (C). . . . .	91

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 - Relação de concentração gasosa e coeficiente de carbonatação. . . . .	29
Gráfico 02 - Composição granulométrica da areia utilizada na dosagem. . . . .	53
Gráfico 03 - Composição granulométrica da brita utilizada na dosagem. . . . .	55



Gráfico 04 - Perfil de exposição das amostras durante pré condicionamento. . . . .	73
Gráfico 05 - Perfil de exposição das amostras durante ensaio de carbonatação acelerado. . . . .	76
Gráfico 06 - Indicativos de trabalhabilidade relacionado com teor de fibras. . . . .	80
Gráfico 07 - Valores de resistência à compressão por idade em comparativo. . . . .	81
Gráfico 08 - Valores de resistência à compressão por traço. . . . .	82
Gráfico 09 - Valores de resistência à flexão. . . . .	83
Gráfico 10 - Valores do ensaio de absorção por imersão. . . . .	85
Gráfico 11 - Resistência das amostras submetidas ao ensaio de absorção. . . . .	85
Gráfico 12 - Relação resistência e índice de vazios. . . . .	86
Gráfico 13 - Valores ensaio de absorção por imersão das amostras carbonatadas .	94
Gráfico 14 - Resistência das amostras carbonatadas submetidas ao ensaio de absorção. . . . .	95
Gráfico 15 - Relação resistência e índices de vazios das amostras carbonatadas. .	96
Gráfico 16 - Valores de resistência a compressão das amostras carbonatadas. . .	97

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 01 - Relação entre profundidade da carbonatação e resistência. . . . .	27
Tabela 02 - Composição do cimento. . . . .	51
Tabela 03 - Composição granulométrica da areia utilizada na dosagem. . . . .	53
Tabela 04 - Composição granulométrica da brita utilizada na dosagem. . . . .	55
Tabela 05 - Composição dos traços. . . . .	58
Tabela 06 - Quantidades de CPs por dosagem. . . . .	61
Tabela 07 - Indicativos de trabalhabilidade de cada traço. . . . .	79
Tabela 08 - Valores de penetração a carbonatação. . . . .	92
Tabela 09 - Resultados médios de profundidade de carbonatação. . . . .	93
Tabela 10 - Relação carbonatação e resistência. . . . .	98

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

°C	Graus <i>Celsius</i>
a/c	Água-cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento <i>Portland</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARI	Alta Resistência Inicial
atm	Atmosfera
C <sub>2</sub> S	Silicato bicálcico
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico
C <sub>4</sub> AF	Ferro aluminato tetracálcico
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
cm <sup>3</sup>	Centímetros cúbicos
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CP	Cimento <i>Portland</i>
CPC	Concreto de Cimento <i>Portland</i>
CPs	Corpos-de-prova
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
g	Gramas
HCl	Ácido Clorídrico
ISAT	<i>Initial Surface Absorption Test</i> (Ensaio de absorção superficial inicial)
LATEC	Laboratório da Tecnologia da Construção

m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
mm	Milímetros
Mpa	Megapascal
NaHCO <sub>3</sub>	Bicarbonato de sódio
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NM	Normalização do Mercosul
PE	Polietileno
pH	Potencial Hidrogeniônico
PP	Polipropileno
PVA	Poliacetato de vinila
RH	<i>Relative Humidity</i> (Umidade relativa)
RILEM	<i>Reunion Internationale de Laboratoires D'essais et Matériaux</i> (Encontro Internacional de Laboratórios e Materiais de Ensaio)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1 Problema de pesquisa	13
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo geral	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 Justificativa da pesquisa	14
1.4 Estrutura do trabalho	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>18</b>
2.1 Durabilidade e vida útil das estruturas	18
2.1.1 Mecanismos de degradação das estruturas de concreto armado	21
2.1.1.1 Carbonatação	25
2.1.1.1.1 Concentração gasosa de exposição	27
2.1.1.1.2 Temperatura de exposição	29
2.1.1.1.3 Umidade relativa de exposição	30
2.1.1.2 Corrosão de armaduras	30
2.1.2 Ensaio de Campo	33
2.2 Concretos com fibras	37
2.2.1 Propriedades	37
2.2.2 Vantagens	38
2.2.3 Tipos de fibras	39
2.2.3.1. Polipropileno	40
2.2.3.2. Vidro	41
2.2.3.3. Carbono	42
2.2.3.4. Aço	42
2.2.3.5. Aramida	43
2.2.3.6. Naturais	43
2.2.4 Concretos com fibras submetidos a ataques de agentes agressivos	43
<b>3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>49</b>

3.1 Estratégia de pesquisa	49
3.2 Caracterização dos Materiais	50
3.2.1 Cimento	51
3.2.2 Areia	51
3.2.3 Brita	53
3.2.4 Fibra	56
3.2.5 Água	56
3.2.6 Aditivo	56
3.3 Dosagem	57
3.4 Ensaio de controle mecânico	61
3.4.1 Resistência à compressão	62
3.4.2 Flexão a 4 pontos	62
3.4.3 Absorção por imersão e índice de vazios	62
3.5 Carbonatação	62
3.5.1 Confeção do protótipo de câmara de carbonatação acelerada	63
3.5.2 Preparação das amostra para ensaio de carbonatação acelerada	72
3.5.3 Resistência à compressão	76
3.5.4 Medição da penetração da carbonatação na peça	77
3.5.5 Absorção por imersão	78
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>79</b>
4.1 Trabalhabilidade	79
4.2 Ensaio de controle mecânico	81
4.2.1 Resistência à compressão e à flexão	81
4.2.2 Absorção por imersão	84
4.3 Carbonatação	87
4.3.1 Protótipo	87
4.3.2 Penetração da carbonatação	89
4.3.3 Ensaio de controle mecânico	94
4.3.3.1 Absorção por imersão	94
4.3.3.2 Resistência	96
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>99</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE</b>	<b>111</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil desempenha significativa e imprescindível importância na economia de um país, sendo ela a responsável pela criação de empregos e fortalecimento de todas as outras áreas dentro do âmbito da economia do país (BRASIL, 2013). Deste modo, por ser um setor de relevante importância para a economia, buscam-se inovações tecnológicas que visem atender as demandas atuais para o setor, fazendo uma redução dos custos, dentro do possível, com o uso de materiais de construção adequados, buscando sempre o aperfeiçoamento de seu emprego e de suas características. A necessidade de inovação dos materiais de construção não se dá apenas com intuito financeiro, é, segundo Souza e Ripper (1998), acompanhado do rápido crescimento do setor, que, em um curto período de tempo, exigiu que os materiais tivessem propriedades mais peculiares, e, consequentemente, maiores estudos e tecnologia aplicadas para atingir a estas propriedades.

O concreto é o material de construção civil mais utilizado no mundo, juntamente com o aço, que juntos formam a maioria das estruturas prédios do mundo (NEVILLE; BROOKS, 2013). Para o aço são utilizadas padrões de fabricação que fazem com que o material obtido possua poucas variações, ao passo que o concreto possui uma grande variação de suas características, o que nos remete a maiores esforços de instituições de ensino, que deveriam ensinar mais sobre o concreto, bem como efetuar maiores estudos acerca do comportamento e características destes (NEVILLE; BROOKS, 2013). Dal Molin e Tutikian (2008) mencionam que mesmo sendo o material mais utilizado no mundo, em quantidade, o concreto carece investimentos em estudos e pesquisas que englobam as

características que estes podem atingir, não apenas as propriedades convencionais do concreto.

O concreto tem como principal característica a resistência à compressão, sendo esta uma das mais exigidas para as estruturas de pilares, que estarão sujeitos a suportar toda a carga de determinada edificação, e com isso, têm-se que este deve atender a valores mínimos de resistência (OLIVEIRA, 2016). A resistência é expressa como sendo a capacidade do material em suportar determinada tensão em condições normais, ou seja, antes de sofrer ruptura, mas esta pode sofrer alterações significativas de valores, pois ao se considerar a quantidade de variáveis que a estrutura está exposta, bem como a peculiaridade entre a durabilidade de seus componentes vê-se que este material não é permanente, embora tenha vida útil elevada quando comparado a outros materiais de construção (OLIVEIRA, 2016).

O concreto é um material instável ao longo do tempo, e, que altera suas características de acordo com as características de seus componentes e a resposta destes às condicionantes do meio ambiente de exposição (SOUZA; RIPPER, 1998). Para Oliveira (2016) as características e propriedades que o material desenvolve qualificam o concreto. Contudo a resistência à compressão a que foi dimensionado pode não atingir uma resistência mínima na condição real, ou seja, diferente da projetada, e com isso, ruir a edificação; isto ocorre por uma série de fatores que envolvem desde o material de composição, o processo de fabricação e até o ambiente. É neste contexto que se inclui a resistência dos concretos a resistência aos agentes agressivos, onde os elementos estruturais, geralmente confeccionados de concreto e aço, e que devem suportar as cargas as quais estão expostos, ainda que possam ter suas características alteradas devido a agressividade do meio em que estão inseridos.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define classes de agressividade para estruturas de concreto, de acordo com o ambiente em que estão inseridos, como exemplo de locais marinhos, locais suscetível a respingos de maresia, próximos a pólos industriais, ambientes rurais e grandes centros urbanos; portanto, percebe-se que ao se dimensionar estruturas deve-se considerar os mecanismos de degradação do



concreto de acordo com o meio ao que está inserido, pois o mesmo pode se tornar determinante para a ruína de uma edificação, devido a redução da resistência, ou alteração de outras características do material estrutural.

Dentre os mecanismos de degradação do concreto está o fenômeno de carbonatação do concreto armado, quando ocorre em grandes profundidades, permite que o aço sofra corrosão, e com isso há a perda da capacidade estrutural do material. A carbonatação é um fenômeno ocorrente em todas estruturas de concreto expostas a ar atmosféricos, e deve-se dar maior atenção em ambientes com ciclos de molhagem e locais pouco ventilados, ou com grande concentração de dióxido de carbono como garagens em subsolos (SOUZA; RIPPER, 1998).

A carbonatação do concreto vai ocorrer, devido a permeabilidade do concreto, o qual possui poros (MEHTA; MONTEIRO, 2014); então o que é dever dos projetistas e executores é adotar tecnologias que visem retardar tal ocorrência, a fim de garantir a estrutura vida útil adequada, adotando insumos na confecção do concreto que forneçam ao material a melhoria na característica de penetração destes agentes agressivos, ou adotar outros materiais para impermeabilizar tais estruturas, ou ainda utilizar estas em conjunto em prol da segurança da estrutura da edificação. Um dos materiais que, adicionado a confecção em quantidades adequadas, permite reduzir a permeabilidade do concreto e torná-lo menos poroso bem como sofrer menos fissuras no seu endurecimento é a fibra de polipropileno (PAULON *apud* PELISSER, 2002).

### **1.1 Problema de pesquisa**

A pesquisa visa evidenciar o quanto diferentes adições de fibras de polipropileno (PP) monofilamento auxiliam na resistência a penetração da carbonatação em concretos comuns, esta característica visa ser alcançada com redução dos poros vazios no concreto e da redução das fissuras por secagem, propriedades estas que são propiciadas pela adição das referidas fibras.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho de conclusão é avaliar a profundidade de carbonatação em concretos com diferentes teores de fibras de polipropileno do tipo monofilamento, ao ser submetidos a ensaio de carbonatação acelerada, em protótipo que será confeccionado.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho de pesquisa são:

- I. Confeccionar uma câmara de carbonatação acelerada;
- II. Efetuar ensaios de carbonatação acelerada no protótipo confeccionado;
- III. Comparar as propriedades e relacionar com a profundidade de carbonatação nos concretos com diferentes teores de fibras de polipropileno monofilamento;
- IV. Verificar se a adição de fibras de polipropileno monofilamento melhora a resistência do concreto a carbonatação;

## **1.3 Justificativa da pesquisa**

Ambientes de garagem fechadas e em subsolos, estão fortemente suscetíveis a tal fenômeno, devido a presença de umidade, e do CO<sub>2</sub> gerados pelos automóveis movidos a combustão, que permanecem no ambiente devido à reduzida capacidade de ventilação do ambiente (PAULETTI, 2007). Tais estruturas das garagens são, por diversas vezes, subterrâneas, ou situam-se abaixo do edifício de ocupação predominante, os pilares e vigas presentes na garagem são estruturas que devem ser preservadas e muito bem dimensionadas, sob pena de ruína de toda estrutura.

A carbonatação que ocorre em todas as estruturas que estão expostas a atmosfera, que contém CO<sub>2</sub>, mesmo que em concentrações baixas, como ocorre em zonas rurais; e é mais frequente em ambientes com maiores concentrações de dióxido de carbono, e com pouca ventilação como garagens e algumas indústrias (PAULETTI, 2004). A carbonatação pode ser definida como a penetração de dióxido

de carbono nos poros do concreto, e que na presença de umidade promove a reação com constituintes do concreto modificando, principalmente, a alcalinidade do compósito, característica esta que impede a oxidação do aço utilizado como armadura do concreto armado (SOUZA; RIPPER, 1998).

Evidencia-se que em concretos que são mais permeáveis, ou seja, que possuem mais vazios em sua composição, o fenômeno de carbonatação ocorre em maior profundidade (MEHTA; MONTEIRO, 2013). A NBR 6118 (ABNT, 2014) delimita, conforme a classe de agressividade, algumas características como cobertura mínima do aço pelo concreto, abertura de fissuras máxima e relação água/aglomerante mínima, devido a condições que podem promover a degradação da estrutura. No caso da carbonatação não torna-se diferente, devido a precauções com a armadura, pois na carbonatação ocorre a redução do pH do concreto que é alcalino. Assim inicia-se a oxidação do aço no interior da estrutura, podendo perder sua secção de resistência, e, dilatando-se promovendo o lascamento do concreto, que por sua vez também perde sua secção, e portanto com as secções reduzidas, reduz-se proporcionalmente a capacidade de resistir aos esforços da edificação.

Deste modo percebe-se a necessidade de pesquisas que definam meios de prevenir a ocorrência deste fenômeno nas estruturas, pois pode tornar-se fator contribuinte para ruína da edificação. Os trabalhos na área de carbonatação não têm padrões normativos, e portanto não são estipulados como proceder os ensaios que avaliam o comportamento da carbonatação, não tendo-se definido valores de concentração de exposição, de temperatura e de umidade; estes fatores são imprescindíveis para que posteriores trabalhos possuam diálogo dos resultados, e possam completar-se e desenvolver teses mais abrangentes sobre o assunto (PAULETTI, 2004). Pauletti (2009) efetua em sua obra a estimativas de durabilidade natural em relação a ensaios de carbonatação acelerada, tendo em vista não possuir muito padrões definidos de como proceder ao ensaio a autora adota valores relacionados a exposição (umidade, temperatura, concentração de CO<sub>2</sub>, relação a/c) acordo com sua experiência, desde que não estejam contrários aos estipulados pela RILEM (1988).

Diversos laboratórios não têm equipamentos que permitem efetuar trabalhos deste tipo, devido a ausência de normativas que o regulam, deste modo, para que seja possível avaliar tal comportamento de carbonatação acelerado do concreto é necessário confeccionar câmaras que proporcionam este tipo de exposição. Ao tornar possíveis tal ensaio pode-se analisar o comportamento da carbonatação e propor melhorias para melhor o desempenho do material.

Aliado a ideia de tentar identificar maneiras de tornar o concreto mais resistente a agentes agressivos, em especial a carbonatação, efetuam-se adições de materiais ao concreto, como as fibras, as quais alteram diversas características do concreto. Para Paulon *apud* Pelisser (2002) a adição de fibras de polipropileno, em quantidades adequadas, pode reduzir a permeabilidade do concreto, bem como reduzir as fissuras ocasionadas pela retração do material enquanto endurece.

Faz-se necessário então investigar o comportamento que o concreto com fibras de PP desenvolve frente a carbonatação que é um fenômeno que ocorre em qualquer estrutura exposta à ar atmosférico, e que pode originar a ruína das edificações.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

Antes de argumentar de maneira mais consistente sobre o comportamento da carbonatação em concretos que têm adição de fibras de polipropileno, faz-se necessário apresentação da estrutura do trabalho. Têm-se a origem da presente tese apresentando no CAPÍTULO 2 uma revisão bibliográfica sobre o conteúdo, onde de um modo geral, aprecia-se as propriedades do concreto como material compósito, onde se apresenta as características que as estruturas de concreto devem atender, bem como algumas das propriedades do material. Também apreciar-se-á no referido capítulo os fatores considerados para definir e nortear o desenvolvimento do trabalho sobre o comportamento do fenômeno de carbonatação do concreto, e sobre pesquisas que englobam, mesmo que de maneira indireta, algum fato que possa ser considerado para definir a construção de um protótipo e das características a serem adotados nos ensaios para avaliação do comportamento

do material. No CAPÍTULO 3 serão apresentados os procedimentos metodológicos que serão utilizados no trabalho para obter os resultados que serão apresentados e discutidos na segunda etapa do presente trabalho. O CAPÍTULO 4 expõe os resultados e suas discussões, buscando observar e explicar alguns dos padrões encontrados para os valores encontrados. O CAPÍTULO 5 apresenta as considerações sobre o trabalho com uma perspectiva crítica sobre melhorias que poderiam ser implementadas, embasadas nos resultados encontrados. Os referenciais bibliográficos para a realização deste trabalho são apresentados no final.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Durabilidade e vida útil das estruturas**

A construção civil é tem a característica de fornecer bens por intermédio da prestação de serviços, como é o caso de edificações, estradas, e demais atividades onde o engenheiro têm a finalidade de concretizar uma ideia. Como qualquer atividade o produto final pode sofrer uma variação de sua qualidade, tendo em vista o ambiente onde é desenvolvido, ou até mesmo o processo de desenvolvimento. Portanto, observa-se que na execução de empreendimentos há margem para variações da qualidade e, portanto da durabilidade desta obra (MAIA; SOUZA, 2003).

O canteiro de obras é, de modo figurativo, uma fábrica cujo produto a ser fabricado é a edificação, a qual deve atender parâmetros mínimos para ser considerada um produto de boa qualidade. Entre estas fases estão a concepção do produto, do processo e da fábrica (SOUZA, 2000). A qualidade do produto final, bem como sua durabilidade está vinculado aos processos de sua concepção. Desde a fase de projeto até a fase de execução deve-se considerar que os materiais utilizados para tal edificação devem ter características adequadas ao ambiente em que está inserido, bem como serem implementados de maneira condizente com suas características, normas e boas práticas, para que assim se atinja a finalidade esperada da edificação como um todo (SOUZA, 2000).

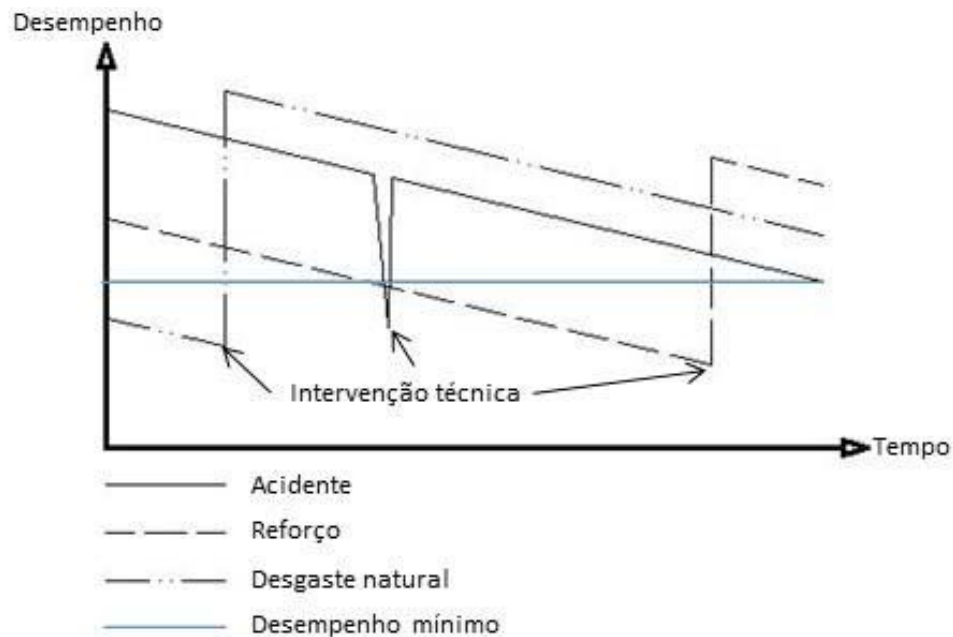
Condicionando a edificação como um produto, a ser de interesse de muitos consumidores, geralmente na condição de residência, observa-se que a construtora, e o profissional técnico devem promover à edificação as condições de durabilidade, sob pena de responsabilidade de indenização (PORTO NETO, 2007).

Para o código do consumidor (BRASIL, 1990) sob a constatação de qualquer irregularidade a culpa recai sobre o construtor, exceto quando provada que a culpa resulta do consumidor, ou restar provado que o serviço prestado não relaciona-se com o defeito encontrado, ou seja, contemplou a todas as normas de execução e boa prática. Conforme código civil (BRASIL, 2002) é praticável atos de reclamação de problemas encontrados na edificação entregue ao adquirente em cinco anos, sendo que a reclamação deve ser efetuada em 180 dias após sua evidência ou constatação (PORTO NETO, 2007). Conforme NBR 15575-1 de 2013, as estruturas das edificações habitacionais devem ter vida útil de projeto de no mínimo 50 anos, contados a partir da carta de habitação, sendo que destes 50 % deve ser assegurada na concepção do projeto da edificação e o restante atribuído às manutenções realizadas durante sua vida útil (ABNT, 2013).

Ainda, para CONFEA (2017) o profissional responde por negligência, na condição de responsável por patologias encontradas em edificações. Sendo que não é possível eximir-se de culpa ou dolo por alegação de desconhecimento de leis (BRASIL, 2002).

Deste modo observa-se que o profissional deve ter conhecimento ou aprimoração das técnicas e materiais utilizados em construções, a fim de coibir o aparecimento de patologias relacionadas aos tempo de exposição ou de uso da edificação, ou ainda determinar o momento e a intensidade da intervenção de reparo na edificação a fim de frear ou reduzir a velocidade de degradação da mesma, a representação técnica de como se comporta o desempenho de uma edificação está representado na Figura 01. Para suprir tal condição adota-se estruturas que resistem a intempéries e, conseqüentemente, portem-se melhor, resultando no óbice dos problemas relacionados ao uso no tempo da edificação. Esta atribuição deve ser tanto do projetista ao adotar materiais resistentes adequados às solicitações do local como do executor por adotar práticas adequadas (SOUZA; RIPPER, 1998).

Figura 01 - Relação desempenho-tempo.



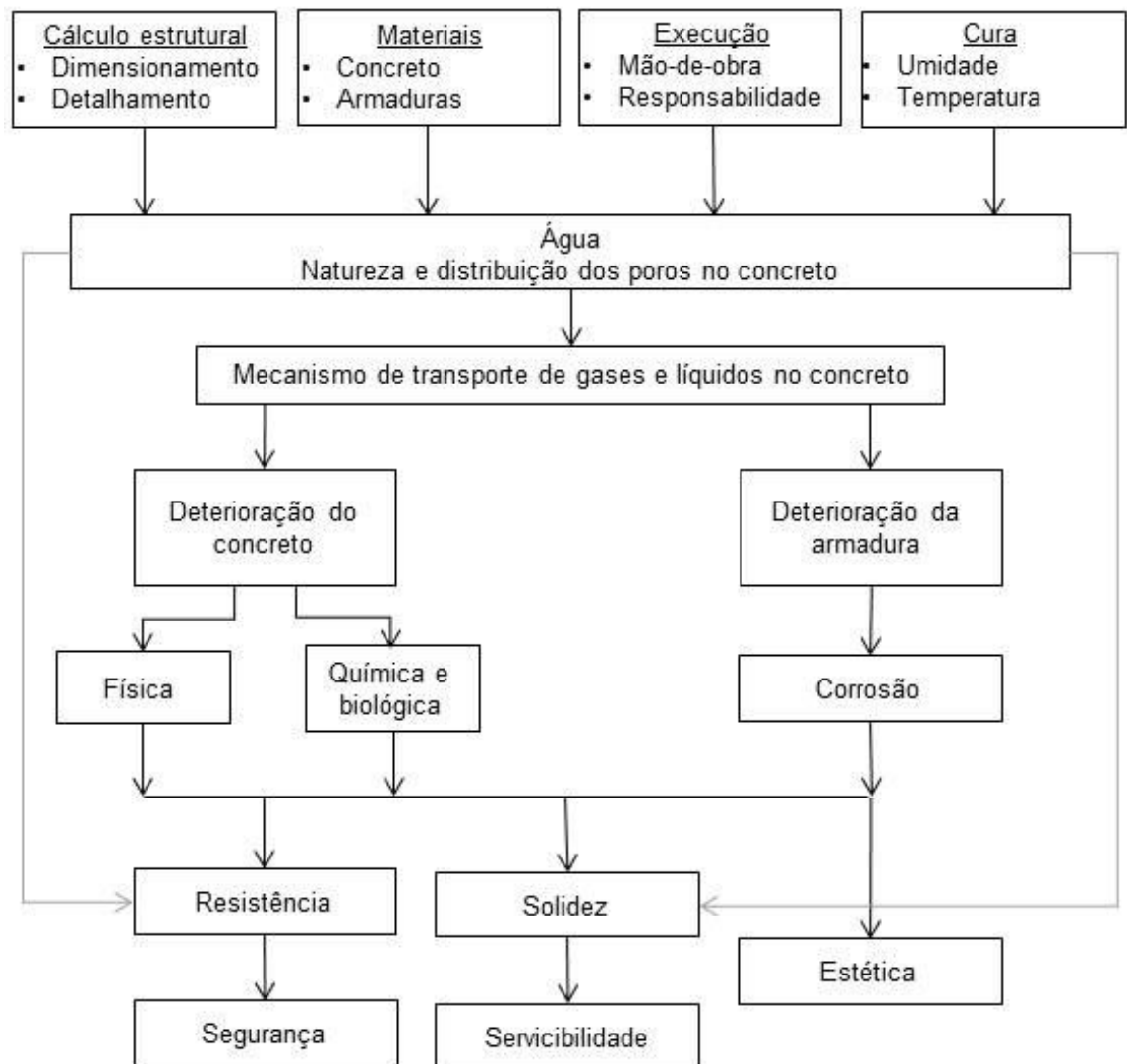
Fonte: Adaptado em 15/09/2019 de Souza e Ripper (1998).

Considerando as características do material e sua resistência a esforços e a intempéries vê-se que a utilização de materiais como o concreto aliado ao uso do aço, na condição de concreto armado, um material compósito, é amplamente difundida pelo mundo. O concreto armado é material de construção que em quantidade é o mais utilizado no mundo, portanto, ter conhecimento sobre suas características e limitações de uso é imprescindível para o profissional de engenharia (LORENZI *et al.*, 2016).

Para saber aliar os conceitos de desempenho e durabilidade das estruturas de concreto armado, a fim de atender a níveis satisfatórios, é necessário entender as inter-relações entre os diversos fatores que exercem influência na durabilidade e no desempenho da estrutura (SOUZA; RIPPER, 1998). Esta inter-relação está demonstrada na Figura 02.



Figura 02 - Relação durabilidade-desempenho.



Adaptado em 15/09/2019 de Souza e Ripper (1998).

### 2.1.1 Mecanismos de degradação das estruturas de concreto armado

Acreditava-se, em 1970, que o concreto era uma material perene, e que seria o maior aliado dos engenheiros, sendo considerados por alguns como indestrutível, e por tal motivo, era muitas vezes empregados displicentemente. Com o tempo observou-se então ocorrências de patologias em estruturas, sobretudo vinculadas à corrosão da armadura. Diante de tal condição iniciou a percepção que o concreto não é imune a agressões externas de qualquer natureza, seja ela química, mecânica, física, biológica ou de suas combinações (RECENA, 2017).

Para emprego do uso do concreto como material estrutural deve-se associar sua resistência, e a variação que a mesma sofrerá com o tempo e com as ações à qual será exposta, pois estas influenciam diretamente a estabilidade, a durabilidade, o uso e a resistência da mesma. Basicamente as ações externas, as quais são muitas vezes negligenciadas pelos profissionais, são de ordem funcional, quando relacionado ao uso da edificação e de ordem ambiental quando promovidas pelo local onde está inserida. As ações ambientais por vezes são menosprezadas causando diversas patologias nas estruturas, entre estas ações vislumbram-se as variações de temperatura, de umidade, força dos ventos, carbonatação, exposição a chuvas ácidas, à fogo, a águas brandas, corrosão, microorganismos, águas e solos contaminados. Todas estas, ou até mesmo a combinações destas podem ser suficientes para tornar inválida o funcionamento uma estrutura (HUSNI, 2003).

A armadura de aço presente no interior do concreto armado, efetua a complementação da resistência do concreto, o qual é um material com resistência muito adequada a esforços de compressão da secção, contudo não tão adequado a esforços de tração, alongamento da seção (SILVA; ALVES; MARQUES, 2013). O aço é um material que é suscetível a degradação ambiental, e por isso fica protegido pelo concreto que é um material que possui uma boa resistência a intempéries, assim, cada material reforça as características do outro, resultando em um material resistente e durável (NEVILLE, 1981). Com isto percebe-se que o concreto deve promover adequadas condições de resistência a degradação tanto dele mesmo quanto do aço em seu interior.

Para entender como o concreto comporta-se ao longo de sua vida útil, é necessário vincular que, basicamente, na condição de material compósito, o concreto consiste na aglutinação de partículas ou fragmentos de agregado em um meio aglomerante podendo ainda ser empregado aditivos ou adições na sua dosagem (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O aglomerante mais comumente utilizado no concreto a nível mundial é o Cimento *Portland*, este aglomerante hidráulico é essencialmente composto por silicatos reativos de cálcio, os quais são estáveis no

meio aquoso após hidratados, e são os principais responsáveis pela resistência do material frente a umidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

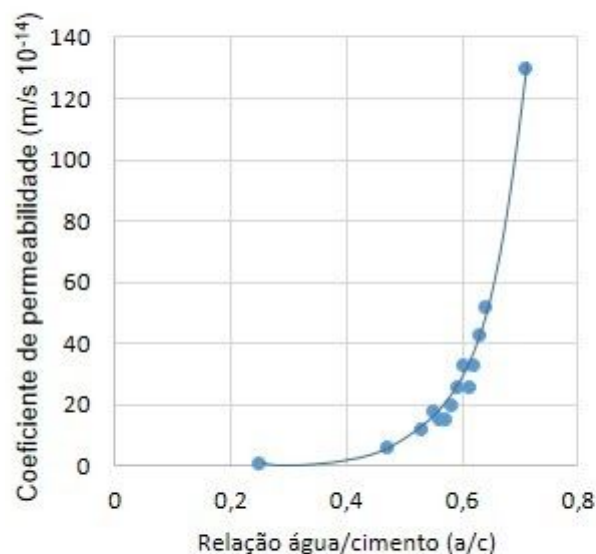
Para estruturas, deve-se considerar que em uma associação simples e direta a quantidade de poros que o material possui está vinculada, de modo inverso, com sua resistência, seja ela mecânica ou química (HUSNI *et al.*, 2003). Um concreto menos poroso, ou seja, com menos vazios em seu interior tende a ser mais resistente devido a dificuldade em propagar microfissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Os poros vazios em seu interior concentram os esforços que o material está recebendo em menores áreas, e portanto, gera-se maiores tensões em pequenas áreas, gerando fissuras pequenas. Ao passo que estas fissuras ligam mais de um destes vazios internamente, até a extremidade verifica-se maior permeabilidade do material, que, deste modo, fica mais suscetível a entrada de substâncias que possam reagir com os materiais que compõem o concreto, como por exemplo os produtos gerados da hidratação do aglomerante, ou as armaduras que reforçam a estrutura (RECENA, 2017).

Os poros no concreto podem ser classificados em macro poros, poros capilares e microporos, sendo os dois primeiros os mais importantes para a durabilidade do concreto, e considerados nos transportes dos agentes agressivos. O transporte dá-se pela água e pelo ar, sendo que neste último a intensidade do transporte depende da umidade relativa do ar (SOUZA; RIPPER, 1998).

Observa-se que a tecnologia e o estudo estão cada vez mais presente na obtenção de materiais de construção e, com isso, promovem a obtenção de concretos cada vez mais resistentes e mais acessíveis de serem produzidos. É comum obter concretos com resistências elevadas e com baixo consumo de cimento, isso é possível devido ao uso de aditivos químicos que proporcionam baixas no consumo de água garantindo a trabalhabilidade adequada do material. Esta relação consegue reduzir a quantidade de água na mistura, e com isso, reduzir os vazios indesejados que tornam o concreto mais poroso, ou seja, mais vulnerável ao ambiente (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O volume de vazios nos capilares na pasta de cimento hidratada reduz com a redução da relação entre a água e aglomerante usado ou ainda com o aumento da idade de hidratação, portanto a água adicionada no concreto que não é utilizada para hidratação do cimento é a responsável por incorporar mais poros ao concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Na Figura 03 é possível visualizar a relação entre o fator água/aglomerante e o coeficiente de permeabilidade do concreto.

Figura 03 - Relação entre coeficiente de permeabilidade e relação a/c



Adaptado em 15/09/2019 de Powers, Copeland, Hayes e Mann (1955).

A água livre na mistura, ao sair, ou ser expulsa da mistura por diferença de concentrações, institui canais que tornam comunicável o exterior com o interior do material, assim, promove um espaço vazio que futuramente será ocupado por água, água esta que ao retornar trará consigo, no mínimo ácido carbônico, responsável pela carbonatação, podendo ainda adentrar no concreto e depositar neste poro outras substâncias nocivas como sulfatos e cloretos (RECENA, 2017). Para Rodrigues; *et al* (2006), basicamente ao reduzir-se a relação entre a água/cimento de um concreto é possível reduzir a quantidade de vazios em no material, então, muitas vezes, deve-se aliar uma adequada granulometria dos agregados, para que não seja necessário grande quantidade de água para promover a trabalhabilidade, portanto, adota-se agregados que possuem sua granulometria bem distribuída

promovendo melhores dispersão na pasta de cimento hidratada, bem como optar por uso de aditivos que tornem esta redução da água possível.

Ainda que seja caracterizado como um material pouco poroso, e tenha resistência adequada, para as ações de resistência mecânica que será solicitado, o concreto da estrutura ainda poderá sofrer retrações que podem adicionar trincas ou microfissuras que por sua vez promoverão a permeabilidade do concreto e, com isso, sua suscetibilidade a degradação (ADORNA, 2016).

Dentre as retrações que podem ocorrer com o concreto algumas são motivadas por perda hidráulica, por variação da temperatura, por presença de material pulverulentos nos agregados, e por finura do cimento; deste modo é preferível adotar o aumento da taxa de armaduras, ou ainda adicionar fibras incorporadas ao concreto, com finalidade de coibir a formação destas fissuras que promoveriam a suscetibilidade de substâncias adentrarem ao concreto e degradar as armaduras (RODRIGUES; *et al*, 2006).

#### **2.1.1.1 Carbonatação**

O cimento é composto de  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$ , sendo no Cimento *Portland* esta composição é de 45 a 60%, 15 a 30%, 6 a 12%, 6 a 8%, respectivamente (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Esta composição advém das reações em altas temperaturas da matéria prima de sua formação, o que promove, ao ser misturado em água, as reações que fornecem à pasta propriedades mecânicas e estrutura mineralógica complexa, promovendo a aderência entre os agregados, e gerando calor (SILVA; *et al*, 2013). Estes produtos gerados pela hidratação podem sofrer reações com o meio que estiverem inseridos.

Dentre as interações do concreto com o meio em que se está inserido, a expressão mais singela deste acontecimento remete a reação de carbonatação. A carbonatação ocorre pela reação entre o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) existente na atmosfera com o hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) que é liberado durante a hidratação do silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e do silicato bicálcico ( $C_2S$ ), componentes do clínquer, matéria prima do cimento (RECENA, 2017).

O hidróxido de cálcio aparece no concreto em forma de cristais, denominados portlandita e constituem 20 a 25% do volume de sólidos presentes na pasta de cimento hidratada, e contribui para a resistência do concreto, mesmo que de maneira limitada, quando comparado ao C-S-H, devido a sua área superficial consideravelmente mais baixa, determinada pela morfologia prismática hexagonal distinta (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O hidróxido de cálcio, por se tratar de uma base forte, promove ao concreto um pH alcalino, e, portanto, o torna suscetível a ataques de ácidos, entre estes, o ácido carbônico o qual advém da reação entre o  $\text{CO}_2$  e a água, ambos presentes no ar atmosférico. Observa-se que em qualquer situação o hidróxido de cálcio é a porta de entrada para agentes agressivos, devido a sua reatividade com ácidos, instaurando processo de salificação, e com isso a redução do pH, resultando na instabilidade do C-S-H, principal responsável pela resistência mecânica do concreto, e, portanto a dissolução da pasta hidratada (RECENA, 2017).

A alcalinidade elevada do concreto é a maior proteção do mesmo contra agentes biológicos, e é considerada como fator de avaliação da durabilidade do concreto (SOUZA; RIPPER, 1998). O pH do concreto varia entre 12,5 e 13,5 e na presença de ambiente ácido encontra-se em desequilíbrio notável, deste modo, qualquer ambiente com pH inferior a 12,5 poderia ser considerado agressivo, ou seja, promoveria reações de equilíbrio, mas se a porosidade do concreto for considerada baixa, e o pH do agente agressivo for superior a 6, pode ser considerado uma reação lenta demais para se levar em conta (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Para Pauletti, *et al.* (2007) os concretos com relação a/c inferiores a 0,5, em condições de exposição natural podem demorar anos até apresentarem alguma evidência de carbonatação, devido a sua baixa porosidade.

Com a redução do pH para valores inferiores a 9, mesmo que ainda possuindo natureza alcalina já podem ser consideradas as preocupações sobre a oxidação da armadura, a qual perdeu a camada passivante que o concreto a fornecia (SOUZA; RIPPER, 1998). A armadura interna ao concreto está despassivada, quer dizer que o aço está suscetível a oxidação, transformando-se em óxido de ferro, perdendo capacidade estrutural, e, com o aumento de tamanho

promove fissuras no concreto, o qual já enfraquecido pelo desequilíbrio do C-S-H tende a ruir, resultando na insegurança da edificação.

É importante lembrar sobre as fissuras ocorridas pela retração em estruturas de concreto armado, pois em fissuras, a suscetibilidade da armadura torna-se maior à oxidação, pois as fissuras promovem maior penetração do  $\text{CO}_2$  na estrutura, atingindo níveis próximos da armadura, efetuando a despassivação da zona do entorno desta, e, conseqüentemente, a corrosão local da armadura, que, na condição de reação em cadeia, ao expandir-se aumenta a espessura da fissura, que por sua vez acelera a carbonatação na peça (SOUZA; RIPPER, 1998). Para SOUZA e RIPPER (1998) nos casos em que a fissura possuir aberturas superiores a 0,4mm, ditas significativas, a carbonatação torna-se acelerada, e a penetração da mesma é orientada pela direção da fissura. Na Tabela 01 é possível correlacionar a resistência do concreto com a profundidade de carbonatação a longo prazo.

Tabela 01 - Relação entre profundidade da carbonatação e resistência

Resistência à compressão aos 28 dias (Mpa)	Profundidade da carbonatação após 30 anos (mm)
20	45
40	17
60	5
80	2

Fonte: adaptado em 19/09/2019 de Parrot (1987).

Para a compreensão da ocorrência da carbonatação no concreto deve-se ainda considerar alguns fatores que podem modificar o regime de velocidade que esta reação ocorrerá, como é o caso da concentração gasosa de dióxido de carbono, da temperatura e da umidade relativa a qual será exposto o material (ADORNA, 2016).

#### **2.1.1.1.1 Concentração gasosa de exposição**

A concentração de  $\text{CO}_2$  é o fator de maior relação direta com a velocidade de ocorrência da carbonatação, tornando mais evidenciável sua ocorrência, quanto

mais elevado for a concentração do meio ao que o material está exposto (PAULETTI, 2009).

É importante ressaltar que ambientes fechados e enclausurados, como o exemplo de garagens, túneis e subsolos tendem a ser mais propícios a concentrar dióxido de carbono, devido a baixa capacidade de renovação do ar. Portanto, nestes locais há maiores concentrações quando comparados com locais de permanente ventilação, ou locais abertos (LUCENA, 2016).

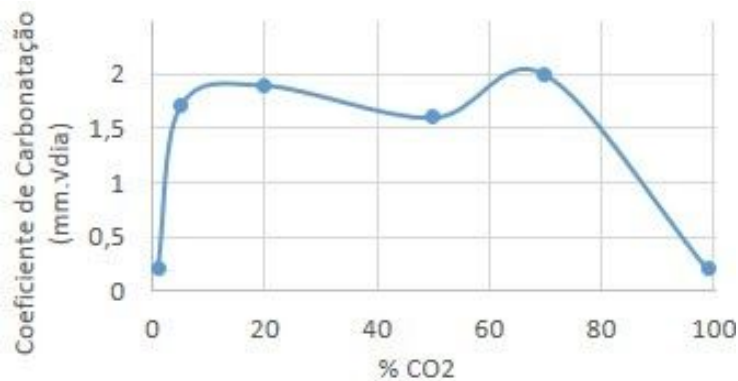
Para Saldanha (2013), a exposição de um concreto a níveis de 4% de CO<sub>2</sub> durante uma semana, poderia remeter a resultados semelhantes ao material exposta a um ano em condições naturais de concentrações de CO<sub>2</sub>. A concentração de dióxido de carbono em grandes metrópoles pode chegar a valores de concentração de 1% (KWANG; WONG, 2005), em ambientes sem trocas gasosas, onde a atmosfera está viciada, podem ser atingidos 1,8% de concentração de CO<sub>2</sub>, ao passo que em zonas rurais e campos abertos, onde não é presente grande tráfego de veículos e não têm presença de grandes indústrias esta concentração pode ficar margeando taxas de 0,03 e 0,05% (WERLE; et al., 2011).

Com isso evidencia-se que para comunidades científicas, deve-se adotar concentrações de CO<sub>2</sub> entre 1 e 100% para ensaios acelerados de carbonatação, ou seja valores superiores ao encontrado naturalmente, contudo o percentual ideal ainda é um fator que propicia dúvidas (PAULETTI, 2009).

Observa-se no Gráfico 01 o comportamento do coeficiente de carbonatação em função da concentração de dióxido de carbono para determinado concreto.



Gráfico 01 - Relação de concentração gasosa e coeficiente de carbonatação.



Fonte: adaptado em 15/09/2019 de Rogeau *apud* Pauletti (2009).

Observa-se que até valores de concentração de 20% há acréscimo no coeficiente de carbonatação, o qual se mantém parcialmente constante até 50%, após isto há acréscimo para a concentração de 70% e decréscimo significativo até valores de 100%. Para Pauletti (2009) é possível que a quantidade de água gerada ou que a quantidade de carbonatos gerados é maior com concentrações superiores a 20% o que promove a modificação do comportamento crescente que a curva desenvolveria. Ainda para a autora as concentrações de 5 e 20% promovem uma carbonatação mais homogênea, ou seja, mais similar ao que acontece a exposição natural, que comporta-se muito diferente do que ocorre para concentrações de 100% de dióxido de carbono.

#### 2.1.1.1.2 Temperatura de exposição

A temperatura em que o material se encontra afeta o comportamento da água presente nos poros do concreto, como evaporação e condensação da umidade neste, bem como o estimular a mobilidade dos íons através da sua microestrutura (ANDRADE 1992).

Para Papadakis, *et al.* (1991) e Neville (1981) as temperaturas entre 20 e 40 graus *Celsius* não exercem grandes influências para o processo de carbonatação, pois as reações são controladas, ainda, pela difusão. Deste modo, apenas de não ser de grande relevância, a temperatura deve ser considerada nos processos de

carbonatação de um modo geral, pois contribuem para a corrosão da armadura dos concretos armados, devido o aumento da mobilidade de ions, e neste caso, principalmente de agentes agressivos (PAULETTI, 2009).

A temperatura pode ser evidenciada como grande auxiliar das reações de carbonatação quando constatadas grandes amplitudes térmicas em curtos períodos de tempo, o que incentivará o aparecimento de trincas de retração térmica, e deste modo a maior suscetibilidade de penetração de agentes agressivos, auxiliando na velocidade de carbonatação do material (SOUZA; RIPPER, 1998).

#### **2.1.1.1.3 Umidade relativa de exposição**

A umidade relativa é a evidenciação do equilíbrio entre o ambiente de exposição e o material, portanto, não é vinculada ao conceito de percentual de água presente nos poros do concreto exposto, nem mesmo à fração de poros preenchidos com água (PAULETTI, 2009).

A água possui um papel duplo na carbonatação, primeiro ela bloqueia os poros, dificultando a difusão do  $\text{CO}_2$ , e segundo ela é o meio onde ocorre a reação entre o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{Ca(OH)}_2$  (PAPADAKIS; *et al.*, 1991). Os valores de umidade relativa ótima para estimular a ocorrência da carbonatação não são muito bem definidos pelas literaturas, mas, de um modo geral, são compreendidos entre 45 a 80% (PAULETTI, 2009).

A água tem coeficiente de difusão de 10 a 40 vezes menor que o ar, e por isso as umidades relativas próximas da condição de saturação de poros tendem a retardar o processo de carbonatação (ISAIA, 1999).

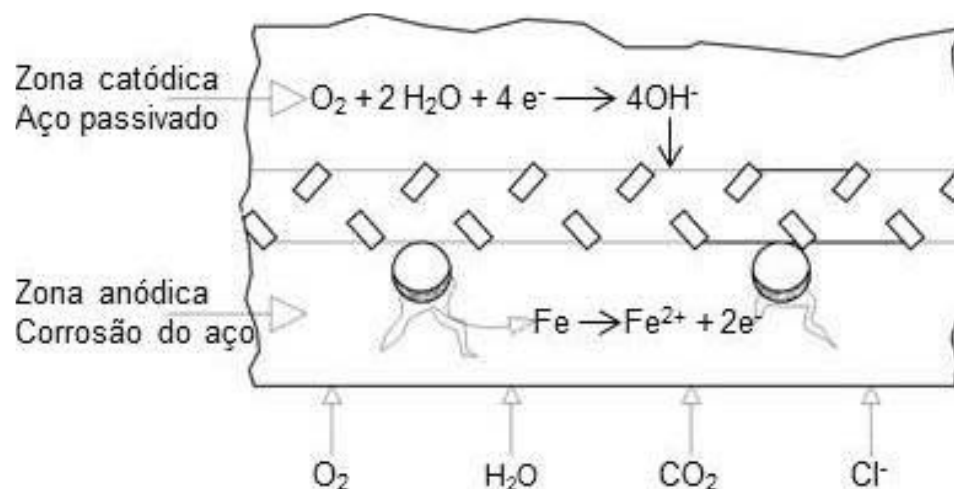
#### **2.1.1.2 Corrosão de armaduras**

Todos materiais tendem a atingir uma determinada estabilidade, a qual é pode ser atingida de diversas maneiras, como reações química, alterações física ou decaimentos radioativos. Para Michaelis (2019) estabilidade é definida como algo que encontrou uma situação de equilíbrio, portanto ao se deparar com elementos na natureza estes tendem a apresentar-se da maneira mais estável o possível.

As reações químicas possuem velocidades de reação direta e indireta, ou seja, a todo momento são formados produtos e reagentes, até o momento em que estas velocidades são iguais, ocorre então o equilíbrio químico da reação. O equilíbrio químico pode ser deslocado ao se alterar o meio em que ocorre as reações, seja com a modificação da concentração dos reagentes, alteração da temperatura, do pH, da pressão, ou com adição de catalisadores na reação. Portanto observa-se que o aço, na condição de armadura, presente no concreto está sofrendo um processo eletroquímico denominado oxidação, que consiste na reação do ferro presente no aço com o oxigênio presente na atmosfera. Esta reação ocorre devido a condições de instabilidade química do material aço, que em sua forma mais estável é encontrado na natureza como óxido de ferro, expresso pela composição  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (OLIVEIRA; *et al.* 2013).

Para Souza e Ripper (1998) só é possível de ocorrer os processos de corrosão eletroquímica, se houver um ânodo (zona de ocorrência da oxidação), um cátodo (zona de ocorrência da redução), um condutor elétrico (armadura) e um eletrólito (água presente nos poros). Este procedimento de corrosão das armaduras está representado na Figura 04.

Figura 04 - Mecanismo de corrosão da armadura.



Fonte: Adaptado em 15/09/2019 de Souza e Ripper (1998).

Dentro do concreto, devido a condições de alcalinidade elevada, esta reação não ocorre, devido a redução da velocidade de reação de formação de óxido de

ferro, dito ferrugem. Esta velocidade torna-se muito baixa, evidenciando assim, uma estabilidade química, a qual é quase imutável, fazendo com que o aço não sofra oxidação. Contudo ao se reduzir o pH do concreto a valores inferiores a 9, por processos de carbonatação, lixiviação, sulfatação, e ataque de cloretos inicia-se o processo de oxidação da armadura; processos estes que servem como catalisadores para oxidação do ferro (Fe)(SOUZA; RIPPER, 1998).

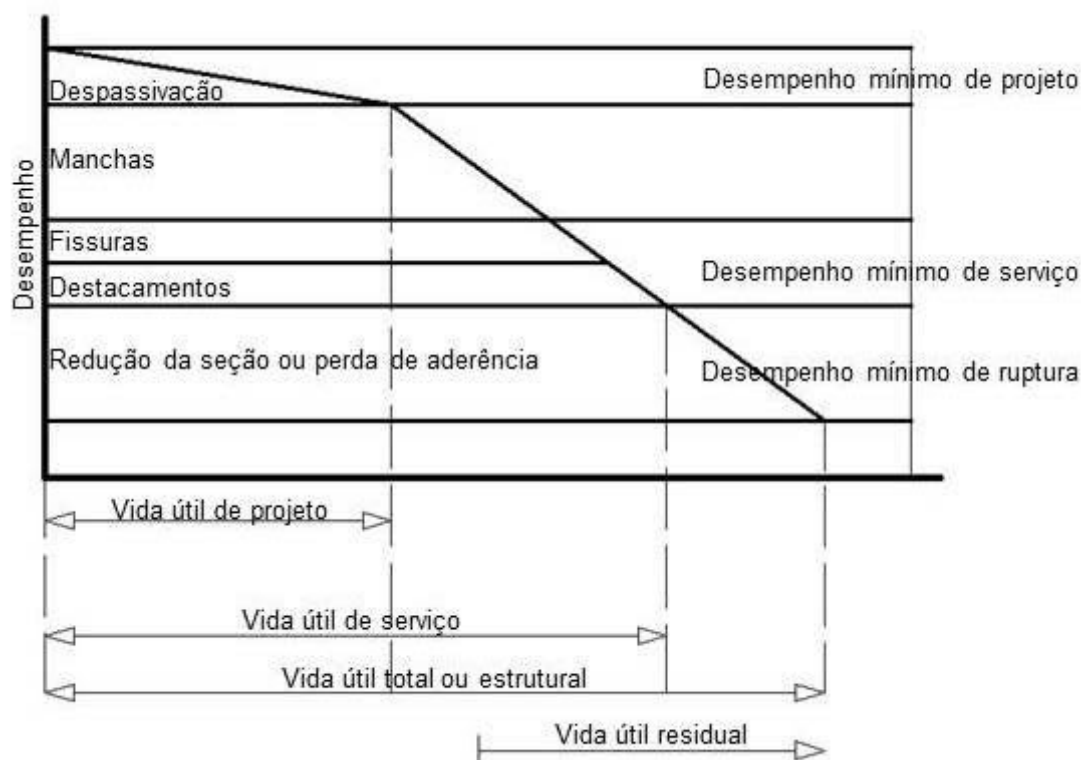
A corrosão ocorre na fase aquosa, no caso do concreto armado, a solução dentro dos poros internos, promove o referido fenômeno, portanto, concretos com muitos poros, e concretos com ciclos de molhagem, tendem a estar mais suscetíveis a esta degradação da armadura (HUSNI *et al.*, 2003).

O óxido de ferro, conhecido como hematita, ou óxido férrico, proveniente da reação com o oxigênio possui resistência mecânica muito inferior ao aço utilizado para reforço da estrutura, deste modo, inicia-se a preocupação com a segurança das edificações. A ferrugem possui menor peso específico, deste modo, ocupa mais espaço que o aço, e por este motivo iniciam-se os processos de fissuração do concreto do entorno da armadura oxidada, portanto, além de não possuir resistência mecânica adequada, o óxido de ferro causa redução da seção de concreto, promovendo, de modo ainda mais, significativo a redução da resistência da estrutural, corroborando para um colapso da edificação (HUSNI *et al.*, 2003), assim com a fissuração do concreto aumenta-se a velocidade de oxidação da armadura. Observa-se então que a oxidação, corrosão, das armaduras desenvolve um comportamento de reação em cadeia, promovendo ainda mais oxidação e, por consequência, redução da resistência..

É possível evidenciar onde está ocorrendo a corrosão das armaduras, devido ao aparecimento de fissuras, delaminação ou lascamento do cobrimento, e muitas vezes sua orientação segue os alinhamentos dos reforços da estrutura (HUSNI *et al.*, 2003). Principalmente nas estruturas com corrosão das armaduras que estão suscetíveis a elevados teores de umidades, é evidenciável afloramentos de óxidos nas superfícies do concreto (HUSNI *et al.*, 2003).

A consequência do fenômeno de carbonatação, corrosão das armaduras influi diretamente na desempenho da edificação, esta relação de desempenho está representada na Figura 05, onde evidencia-se as ocorrências destes fenômenos com a vida útil da edificação.

Figura 05 - Relação entre o desempenho e a vida útil da edificação.



Fonte: adaptado em 18/09/2019 de Helene apud Figueiredo e O'Reilly *et al* (2003).

### 2.1.2 Ensaios de Campo

Evidenciando-se que o uso do concreto, na condição de material estrutural, deve ter a resistência como sua maior características, os ensaios mais aplicados em obras são, basicamente, o de resistência à compressão, a partir de amostras obtidas durante a concretagem, ou seja, retiradas em estado fresco diretamente de onde foi confeccionado ou transportado, este controle serve como controle do material empregado, podendo efetuar com este ensaios de resistência, bem como de porosidade para avaliar seu desempenho na condição de material estrutural (RECENA, 2017).

Portanto para avaliar a resistência do concreto empregado como material estrutural pode-se efetuar a confecção, no estado fresco, de amostras durante a concretagem, para verificar, a partir de ensaios de controle no estado endurecido do concreto, a resistência à compressão axial do concreto, à flexão a 3 ou 4 pontos, e ainda, pode-se efetuar a avaliação de volume de vazios do concreto endurecido (RECENA, 2017). Durante o estado fresco recomenda-se o ensaio de *slump test*, que têm a função de verificar a trabalhabilidade do concreto, o que permite ver se o material terá característica de preencher os espaços entre as armaduras da maneira adequada (RODRIGUES; et al, 2006).

Para que seja possível avaliar as condições de exposição que as estruturas estão expostas, é necessário compreender que são evidenciáveis métodos de controle destrutivos e não destrutivos. Basicamente, os não destrutivos consistem em avaliar sem modificar as características, ou sem a retirada do material do local de avaliação. Dentre os ensaio de controle de material, não destrutivos, destacam-se os métodos esclerométricos, os de resistência à penetração, os de ultrassom e a termografia infravermelha (MEDEIROS, 2019).

Os métodos esclerométricos, seguem o que preconiza a NBR 7584, e devem ser empregados preferencialmente em circunstâncias onde tenha-se averiguação da uniformidade da dureza superficial da estrutura de concreto (ABNT, 2012). Com o uso do penetrômetro Windson é possível estipular a resistência a compressão do concreto, caracterizando-se como um método de resistência a penetração da estrutura de concreto (MEDEIROS, 2019).

Os métodos que envolvem ultrassom e termografia infravermelha, e os que aliam os dois são métodos envolvem equipamentos mais dispendiosos. O método de ultrassom é preconizado pela NBR 8802 (ABNT, 2019). Para Evangelista (2002) a utilização de equipamentos de ultrassom pode detectar trechos da estrutura que encontram-se em diferentes regimes de comportamento, elástico ou plástico, é possível ainda, segundo LORENZI *et al.* (2016), avaliar os diferentes componentes do concreto, a partir de sua densidade, podendo mapear a evolução das propriedades do concreto e do aço, na condição de porosidade e trincas ou de

corrosão, respectivamente. Os ensaios termográficos visam a exposição da presença de anomalias, ou seja, trincas e descontinuidades de determinado material (LORENZINI, 2016; EVANGELISTA 2002).

Os ensaios de absorção de água por capilaridade são boas práticas para avaliar a durabilidade potencial que um concreto expostos a ambientes agressivos terá, indicando a velocidade de penetração dos ions agressivos, ou seja, quanto menor a porosidade, maior sua durabilidade potencial (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Para Mehta e Monteiro (2014) os dois métodos básicos para medir a absorção de água em campo são o ensaio de absorção superficial, conhecido por ISAT - *Initial Surface Absorption Test*, e o método de Figg. Ambos métodos visam analisar a permeação do concreto, ou seja, analisar a quantidade e a comunicação entre os poros existentes no concreto.

Após endurecido, os ensaios que permitem avaliar o desempenho do concreto armado, têm um carácter de avariar, ou seja, tendem a retirar amostras do material, na forma de testemunhos para verificação da resistência real presente na estrutura, a retirada dos testemunhos segue a NBR 7680-1 (ABNT, 2015; CASTRO, 2009). É possível avaliar, com estas amostras retiradas, o pH da amostra e com isto a penetração da carbonatação, a porosidade da amostra, e a resistência à compressão.

Além das amostras de avaliação do desempenho do concreto, é possível avaliar a atividade das trincas, se orientadas pela armadura, indicativo de corrosão das armaduras, se desorientadas, é possível avaliar a atividade destas, por meio de medições periódicas, com intuito de avaliar se podem sofrer aumento de espessura prejudicando a integridade do material e potencializando efeitos da carbonatação (FIGUEIREDO *et al.*, 2003). Para avaliar se houve redução de pH de algum local do concreto é possível utilizar soluções com indicativos de cores para análise de pH, como é o exemplo de soluções de fenolftaleína, a qual apresenta cores mais vívidas avermelhadas conforme maior for o pH, caso não venha a ter tonalidade, indica que houve redução do pH; esta avaliação só pode ocorrer na superfície em que a solução fora borrifada (WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011).

Tendo em vista que a carbonatação ocorre naturalmente após transcorrido grandes períodos, os ensaios de laboratório visam acelerar a sua ocorrência com maiores concentrações de CO<sub>2</sub>; de modo que seja possível avaliar o comportamento do referido fenômeno. A regulamentação de tais ensaios ainda não é padronizada, o que dificulta muitas vezes a integração das pesquisas na área, observa-se que a *Reunion Internationale de Laboratoires D'essais et Materiaux* - RILEM, por meio do CPC-18 (RILEM, 1988) apresenta os procedimentos para a medição da profundidade de carbonatação das amostras já carbonatadas, mas não há definições sobre como devem-se conduzir os ensaios de carbonatação.

Para pauletti (2004) há outros métodos que podem auxiliar e complementar os parâmetros de medição da profundidade de carbonatação, dentre estes destacam-se a petrografia, diferença de massa, difração por raios X, análise térmica diferencial, termogravimetria, determinação do pH através de titulação das soluções dos poros e espectrofotometria no infravermelho. Estes ensaios são aplicados de acordo com a necessidade, disponibilidade e podem ser de difícil execução, ter custo bem elevado e serem muito incomuns (KAZMIERCZAK *et al*, *apud* PAULETTI, 2004).

A realização do ensaio de carbonatação consiste em efetuar uma fratura, ortogonal à superfície do concreto da estrutura a ser analisada, muitas vezes efetuada nas adjacências das armaduras, e borrifar a solução de fenolftaleína. Para ensaios em laboratório busca-se a fratura em sentido longitudinal a maior dimensão da amostra. Deve-se atentar para o tempo entre a aspersão da solução a qual deve ser imediatamente aplicada após à ruptura da amostra, a fim de evitar a reação do ambiente com o CO<sub>2</sub> presente na atmosfera, após a secagem do reagente pode-se aplicar resina incolor e sem brilho para fixação da coloração na amostra (PAULETTI, 2004).

A medição da profundidade de carbonatação ocorre após 24 horas da aspersão do indicador e deve ter precisão de 0,5mm, não sendo considerados os cantos das amostras, bem como em concretos com agregados de grande dimensão,



estes devem ser desconsiderados, efetuando-se a medição apenas na pasta de cimento (RILEM, 1988).

## **2.2 Concretos com fibras**

A adição de fibras discretas em concretos de aglomerante hidráulico, como o cimento *Portland*, por exemplo, é considerada concreto reforçado com fibras, conhecido como CRF, nome denotado do inglês *Fiber Reinforced Concrete* - FRC (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

As fibras, possuem vários tamanhos e formatos, geralmente possuem diâmetro e comprimento limitado a 0,5 e 50mm, respectivamente, e têm a característica de armadura difusa dentro do concreto (SOUZA; RIPPER, 1998).

Algumas das características do concreto tendem a ser alteradas, ao se fazer a adição de fibras descontínuas no concreto convencional de Cimento *Portland*. Para que seja possível entender qual característica obter-se-á otimizada no material a partir da adição de fibras, deve-se entender quais características a fibra possui e, se estas são compatíveis como material cimentício do concreto no qual será incluída (NEVILLE; BROOKS, 2013).

### **2.2.1 Propriedades**

O concreto é um material cuja resistência à compressão é, de um modo geral, excelente, contudo possui valores de resistência à tração e de alongamento de ruptura pequenos, deste modo, para suprir tal deficiência opta-se pelo uso de armaduras, as quais tendem a controlar tal comportamento (SOUZA; RIPPER, 1998).

Diferentemente das armaduras convencionais de barras, de fios ou de cabos, as fibras ou armaduras de fibras são descontínuas e distribuídas de modo homogêneo no concreto, constituindo uma armadura difusa, mas estas não são substitutas para as armaduras convencionais, são complementares, e tendem a otimizar as características do concreto como material de ruptura frágil (SOUZA; RIPPER, 1998).

As fibras incorporadas ao concreto não modificam completamente suas propriedades, apenas reforçam aquelas que se visa otimizar. O comportamento do produto depende das propriedades da matriz cimentícia, da aderência promovida entre a interface do material cimentício e as fibras, e também, das propriedades fornecidas pelo tamanho, quantidade e material de composição das fibras (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A adição de fibras aumenta ou diminui o módulo de elasticidade, de acordo com o material utilizado na fibra, e em quantidade de até 2% do volume do concreto não resultam em valores muito diferentes de módulo de elasticidade e resistência à tração e compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2014), tendo em vista que suas propriedades são também dependentes das da matriz cimentícia.

A eficiência das fibras dentro do compósito depende de alguns fatores, como por exemplo a relação entre o comprimento e diâmetro da fibra empregada, o seu módulo de elasticidade, a concentração de dosagem e até as características do concreto, como as matrizes de altos consumos de cimento, que tendem a responder de maneira mais adequada a adição de fibras (RODRIGUES; et al, 2006).

A adição de fibras, para que seja possível alcançar melhores resultados, ocorre em concretos com baixas relações de água/aglomerante, os quais são confeccionados com alto teor de cimento na mistura, portanto ter-se-á maiores valores de resistência, e conseqüentemente, maiores retrações volumétricas devido a secagem do compósito (RODRIGUES; et al, 2006).

### **2.2.2 Vantagens**

A incorporação de fibras discretas no concreto promove a melhora da resistência, à fadiga, à fissuração, à impacto e da tenacidade, contudo isto tende a depender dos fatores como a distribuição homogênea em concentrações adequadas do material, por exemplo as incorporações de até 1 % da fração volumétrica são utilizadas para controle da fissuração por retração (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Quando utilizadas em grandes quantidades podem alcançar melhorias consideráveis, e em alguns casos o acréscimo do valor do concreto é compensado

na redução da mão de obra, tendo em vista a redução das armaduras, telas ou tramas empregadas para controle de fissuração por secagem (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em comparação aos concretos normais, após o aparecimento da primeira fissura a capacidade de carregamento do concreto não reforçado reduz rapidamente, por isso que concretos em condições estruturais são considerados como frágeis, ou seja, após a primeira fissura tende a ruir (NEVILLE; BROOKS, 2013). Em alguns casos as fibras são capazes de suportar o esforço e os transmitem para o outro lado da fissura que iniciou sua abertura, impedindo-a de progredir, resultando em uma resistência residual considerável após fissuração (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em ensaios onde o concreto é submetido a flexão o comportamento dos concretos não reforçados tende a perder a resistência de maneira súbita após atingir um pico de carga, ao passo que, os concretos reforçados com fibras reduzem de maneira gradativa e conseguem sofrer deformações quase 12 vezes maiores, deste modo, considerando que no concreto a característica de tenacidade é obtida por ensaios de flexão, é obtido maiores valores de tenacidade para concretos reforçados com fibras (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Neville e Brooks (2013) cita que a resistência da fibra incorporada ao concreto é proporcional a razão entre o comprimento e o diâmetro da fibra, bem como sua aderência a interface da matriz cimentícia, sendo que o comprimento da fibra deve ser superior a dimensão máxima das partículas dos agregados do concreto, ainda o autor define que o comprimento deve ser inferior ao máximo da fibra, dito crítico, para que não rompa por tração.

### **2.2.3 Tipos de fibras**

As fibras usualmente utilizadas são confeccionadas de aço, de polímeros, de vidro e de alguns materiais naturais tendo as mais variadas formas e tamanhos, para grande parte das fibras podem ser obtidas em macrofibras e microfibras, que consiste em uma classificação de acordo com o diâmetro e o comprimento da fibra,

sendo que as microfibras tendem a proporcionar melhoria das pequenas fissuras agindo como uma micro malha (MEHTA; MONTEIRO, 2014). As microfibras possuem grande eficiência nas ações microestruturais, devido ao seu comprimento e espessura limitada (EHRENBRING, 2017).

As dimensões das microfibras são limitadas a diâmetros inferiores a 50 micrômetros, e de comprimentos pequenos de 20 a 60 mm, já as macrofibras caracterizam-se por diâmetros maiores, com comprimentos similares a da microfibra. A opção de uso das macrofibras e das microfibras considera a condição da função a ser adotada nesta, as macro têm função de voltar-se para o desempenho de reforço após a ocorrência de rompimento da matriz a níveis visíveis, ditos macrofissuração; ao passo que a microfibras agem nas idades iniciais da dosagem, evitando a propagação das microfissuras, ditas não visíveis, a nível microestrutural. A presença da macrofibra afeta o modo de ruptura da matriz, a qual passa a ser suavizada, enquanto a microfibra tende a retardar ou impedir o aparecimento das fissuras de menor dimensão, tendo um viés maior de aplicação voltado para o incremento da durabilidade das estruturas (EHRENBRING, 2017).

#### **2.2.3.1. Polipropileno**

O Polipropileno (PP) é considerado um material polímero, confeccionado de modo industrializado, é fabricado a partir de derivados do petróleo, e devido a tal condição, pode ser confeccionado em diversas formas e tamanhos, diferentemente de materiais de origem natural (NEVILLE; BROOKS, 2013).

As fibras de PP são encontradas comercialmente como multifilamentos ou fibriladas, devido a condição dos materiais polímeros terem má aderência à pasta de cimento, o uso das fibras retorcidas ou onduladas é priorizado para que seja possível atingir melhores características no compósito (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Os polímeros têm baixa rigidez e são mais dúcteis que os materiais de comportamento resistente e frágil, como o vidro (SILVA; ALVES; MARQUES, 2013). A adição de fibras de polipropileno nos concretos convencionais resulta na redução das fissuras por retração de secagem, e são utilizadas para esta finalidade de

maneira ampla, devido às suas características de auxílio durante a fase de endurecimento da pasta cimentícia, e consequente obtenção da resistência, do concreto (SOUZA FILHO, 2012).

Com a adição em pequenas quantidades de fibras de PP, entre 450 e 900 g/m<sup>3</sup> já evidenciam-se reduções significativas das fissuras, sendo que não somente há a redução das ocorrências de fissuras, o uso destas fibras promove ainda a limitação da abertura das fissuras, ou seja, a espessura das fissuras é menor; este fenômeno pode ser justificado por duas linhas de pesquisa que visam advogar sobre o complexo mecanismo da redução das fissuras, alguns atribuem à redução dos poros do concreto causado pela adição das fibras, ao passo que outros atribuem ao módulo de elasticidade da fibra atuante como reforço, quando o mesmo for superior a da pasta de cimento durante os estágios de sua hidratação, pode conter as fissuras em seu estágio inicial até que a pasta de cimento tenha resistência suficiente para tais esforços (RODRIGUES; et al, 2006). Com isso percebe-se que para que se possa otimizar a durabilidade de concretos, a adição de fibras sintéticas, como a de PP pode ser uma boa indicação para ambientes suscetíveis a carbonatação e outros meios de degradação por penetração de agentes agressivos.

#### **2.2.3.2. Vidro**

Em concretos, as fibras de vidro são utilizadas associadas a uma matriz de resina poliéster, e são constituídas de filamentos de 5 a 15 micras. Normalmente, nos concretos, as fibras de vidros são atacáveis pelo meio alcalino gerado pela hidratação do cimento e portanto, perdem, com o tempo a sua resistência, deste modo, em virtude deste problema, a utilização destas deve ser considerado utilizar fibras de vidro com resistência a álcalis, ou fibras com revestimento orgânico, ou ainda, em concretos que não têm grande teor de umidade ambiental, devido ao meio aquoso nos poros que acelera a reação (SOUZA; RIPPER, 1998).

A utilização das fibras de vidro é largamente aplicável na engenharia civil, considerando que sua resistência pode variar de 1000 a 3000 MPa torna-se atrativo como reforço da matéria cimentícia, mas deve-se atentar para os diferentes tipos de fibras bem como suas indicações e valores agregados, muitas destas devido ao

custo são empregadas na engenharia aeroespacial, e não tornam-se atrativas a construção civil (BEBER, 2003).

As fibras de vidro, juntamente com as de aço, são usadas em execução de recapeamentos de pavimentos de concreto de cimento *Portland*, bem como algumas utilizações em elementos pré-fabricados com resistência ao fogo (NEVILLE; BROOKS, 2013).

#### **2.2.3.3. Carbono**

As fibras de carbono possuem elevada resistência, contudo apresentam custo muito elevado, quando comparados com as demais fibras que podem ser incorporadas ao concreto, e possuem finalidades voltadas a reforços estruturais, ou em uso conjunto com armadura poliméricas reforçadas com fibras, que são utilizadas em ambientes muito agressivos, pois não há, nestas estruturas, utilização do aço, portanto, não há preocupações com a corrosão das armaduras (LOURENÇO; SOUZA, 2014).

As fibras de carbono têm baixo peso aliado a altas resistência e rigidez, sendo que de acordo com sua origem são classificadas em primeira, segunda e terceira geração (BEBER, 2003)

#### **2.2.3.4. Aço**

As fibras de aço, quando adicionadas em concretos convencionais, são constituídos por pedaços de fios trefilados ou por aparas de corte, com diâmetros de 0,25 a 0,75 mm ou com largura de 0,15 a 0,4 mm, respectivamente. Em dosagens convencionais, em betoneiras, o uso das fibras com comprimento de 25 mm, pode variar de 1 a 2%, ao se adotar concentrações menores ou tamanhos de fibras superiores, acarreta em perda significativa da trabalhabilidade do material (SOUZA; RIPPER, 1998).

Há a necessidade das fibras terem ganchos ou deformações na superfície para que seja aprimorado a aderência entre a argamassa e as fibras, deste modo, a

resistência a tração fornecida pela fibra pode ser transferida do concreto para o aço (SOUZA; RIPPER, 1998).

O aço adotado nas fibras, assim como o aço da armadura longitudinal pode sofrer oxidação, e por muitas vezes não ter adequado cobrimento pode provocar trincas no concreto com o passar do tempo (NEVILLE; BROOKS, 2013), embora para Souza e Ripper (1998) isto ainda não foi evidenciado em estruturas de concreto armado reforçado com fibras de aço.

#### **2.2.3.5. Aramida**

As fibras de aramida são, dentre as orgânicas, mais populares, por possuírem resistência da ordem de 3000 MPa, com módulos de elasticidade entre 60 a 120 GPa, além de excelente resistência ao fogo e ótimo desempenho em altas temperaturas, mas a sua maior aplicabilidade advém da sua característica de tenacidade, que a permite ser empregada em locais onde a estrutura está sujeita a impacto de veículos ou a grandes carregamentos cíclicos, promovendo a melhora no comportamento de fadiga do concreto (BEBER, 2003).

#### **2.2.3.6. Naturais**

As fibras naturais têm menor valor agregado, como por exemplo, as fibras de juta, sisal e piaçava, e ainda são mais leves e inertes quimicamente, comparadas às fibras de vidro e de aço, contudo, a aderência ao concreto é menor, bem como seu módulo de elasticidade, além de possuírem grande variedade na suas características dependendo da condição de conservação e de uso destas (SOUZA; RIPPER, 1998).

### **2.2.4 Concretos com fibras submetidos a ataques de agentes agressivos**

Para Rodrigues et al. (2016) os concretos que têm adição de fibras são, geralmente, dosados com altos teores de cimento e baixa relação a/c, isto serve para possibilitar otimizar o uso em conjunto deste material. Se forem bem adensados e com fibras bem distribuídas tendem a possuir adequada durabilidade, evitando o aparecimento de fissuras, bem como a reduzir os poros no interior do

concreto, os quais dificultam a atuação dos agentes agressivos no material, tendendo a permanecer com o pH elevado e, conseqüentemente, protegendo a armadura de aço no seu interior.

Diversos trabalhos relacionam o fenômeno da carbonatação em concretos consideram relações a/c a partir de 0,4; e portanto relacionam seus estudos com adaptações matemáticas; uma das grandes problemáticas encontradas para tal assunto refere-se a diferença de modo com são aferidos os diversos resultados, isso devido a falta de regulamentações sobre ensaios deste fenômeno (PAULETTI, 2004).

As fibras tendem a otimizar as propriedades do material, sem efetuar substituições, apenas exigem o uso de aditivos para manter a mesma trabalhabilidade, ou adição de água para tal função (SOUZA, 2014). Comportamento este que difere das adições minerais, as quais geralmente substituem o aglomerante, e por isso reduzem o pH do concreto, ainda que reduzam os poros do mesmo (HELENE apud PAULETTI, 2004).

Para Pelisser (2002) as fibras de vidro, tanto as resistentes a álcalis como as comuns, e demais fibras de origem naturais e até mesmo as sintéticas podem apresentar degradação natural o que pode implicar em problemas de durabilidade no concreto; ainda para o autor, as fibras sintéticas de PP e de PE têm excelente resistência aos álcalis provindos do cimento, deste modo não são reativas dentro do concreto, resultando em ensaios que relatam 30 anos de sem demonstrar problemas de deterioração, portanto mesmo que sofram deterioração o uso de fibras sintéticas é mais adequado tratando-se da durabilidade dos seus componentes, neste caso as fibras.

As fibras são menos sensíveis a corrosão do que a armadura, no caso das fibras de polipropileno não sofrem corrosão, e a sua promove a distribuição mais homogênea das tensões, evitando trincas que permitem a entrada dos agentes agressivos dissolvidos na atmosfera e que podem permear o concreto atingindo a armadura (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Estas características atingidas pelo CRF tende a melhorar a durabilidade do material, pois evidencia-se maior prazo para o



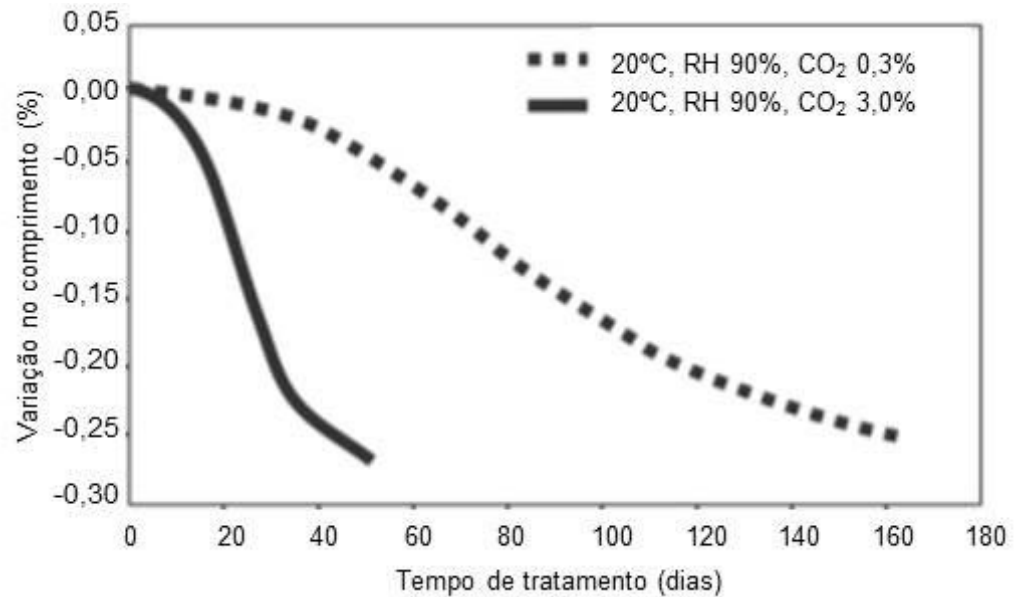
aparecimento das primeiras fissuras, as quais são determinantes para o aumento da penetração dos agentes agressivos no concreto, o qual reduz o pH e permite a corrosão das armaduras.

Para Paulon *apud* Pelisser (2002) a adição de fibras em quantidades de 900g/m<sup>3</sup> reduz em 20% a relação de absorção por capilaridade em relação ao concreto sem adição de fibras. Este comportamento influenciará diretamente na capacidade de penetração de agentes agressivos no material, pois a redução da capacidade de penetração resulta em melhores resultados de resistência aos agentes agressivos.

Para Ehrenbring (2017) é indispensável, para garantir a durabilidade das estruturas, considerar que a variação volumétrica cause fissuras, e impedi-las é necessário a fim de garantir a integridade das estruturas. Para tais condições o uso de fibras é recomendado, visando impedir a aparição das primeiras fissuras causadas pela retração.

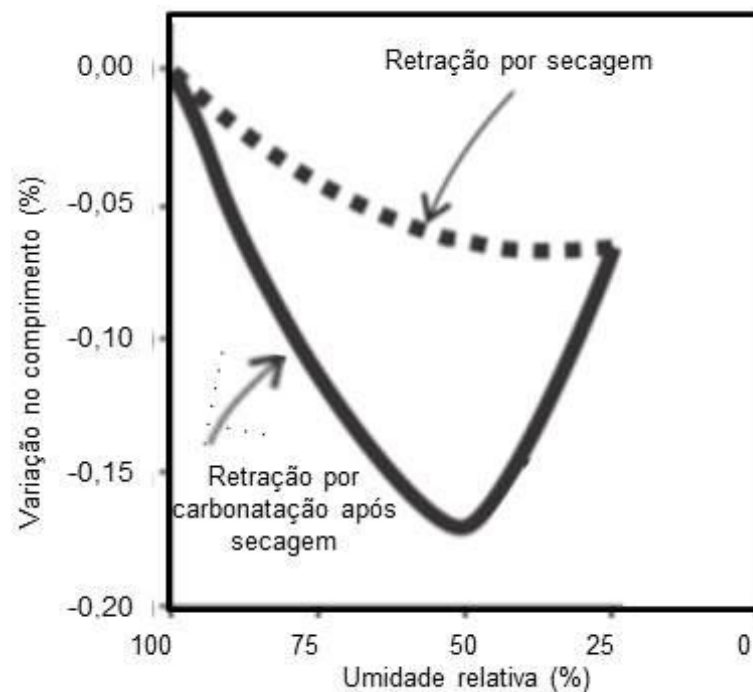
Além da preocupação com a retração de secagem do concreto ocasionado pela cura, dita hidratação do material cimentício, observa-se ainda que ocorre no material a retração por carbonatação, devido a alterações mineralógicas de seus componentes, principalmente a portlandita; esta retração ocasiona a microfissuração em idades avançadas; observa-se que a retração tem sua velocidade de ocorrência proporcional a quantidade de gás carbônico presente ao ambiente que o material está exposto (SOUZA, 2014). Na Figura 06 e na Figura 07 observa-se a relação entre a retração por carbonatação com as características do ambiente ao qual a amostra está exposta.

Figura 06 - Velocidade da retração em função da concentração de dióxido de carbono.



Fonte: Adaptado em 14/10/2019 de Matsushita *et al apud* Souza (2014).

Figura 07 - Carbonatação e a retração em função da umidade relativa do ar.



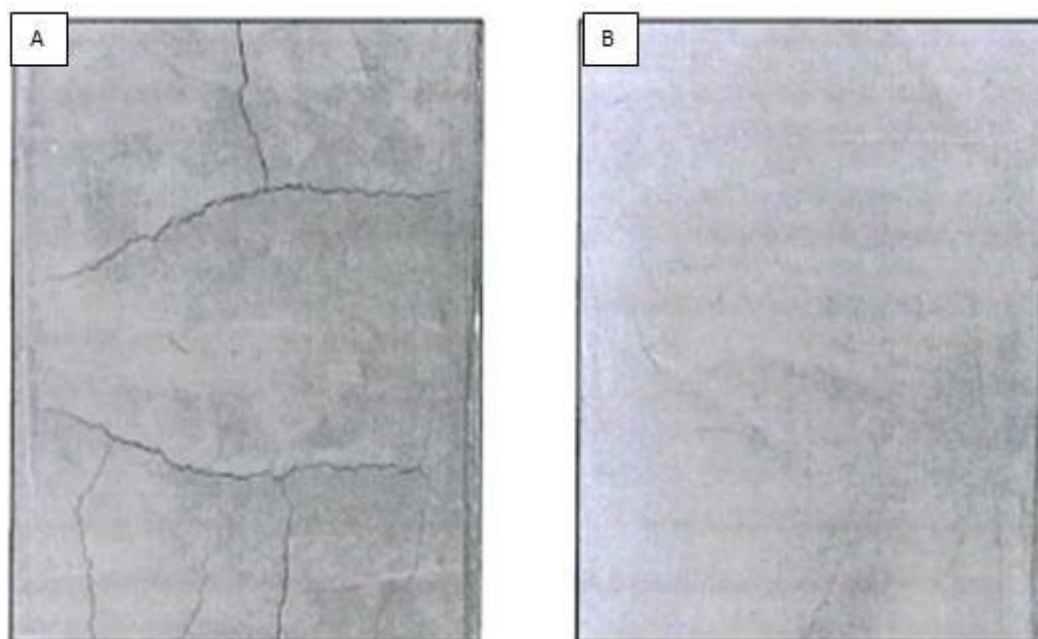
Fonte: Adaptado em 14/10/2019 de Mindess *apud* Souza (2014).

Para que seja possível minimizar os danos que as retrações ocasionam no concreto, o uso de fibras torna-se viável para se modificar atingir estas características, e, dentre as fibras sintéticas utilizadas para reforço do concreto, destaca-se o uso das de polipropileno, sendo esta com menor resistência à tração,

menor módulo de elasticidade, no entanto o custo é significativamente menor, se comparadas às fibras sintéticas de PVA (SOUZA, 2014).

As fibras de PP ao serem adicionadas a mistura em concentração usual de 0,1 % não contribuem para o aumento da resistência do compósito, mas melhoram o comportamento do concreto com relação às solicitações dinâmicas, principalmente as imputadas pela retração, como a por carbonatação (SOUZA FILHO, 2012). Na figura 08 é possível ver a ação das fibras de polipropileno em concretos que sofrem com a retração.

Figura 08 - Fissuras por retração em estrutura de concreto sem adição de fibras (A). Ausência de fissuras por retração em estrutura de concreto com adição de fibras de polipropileno (B).



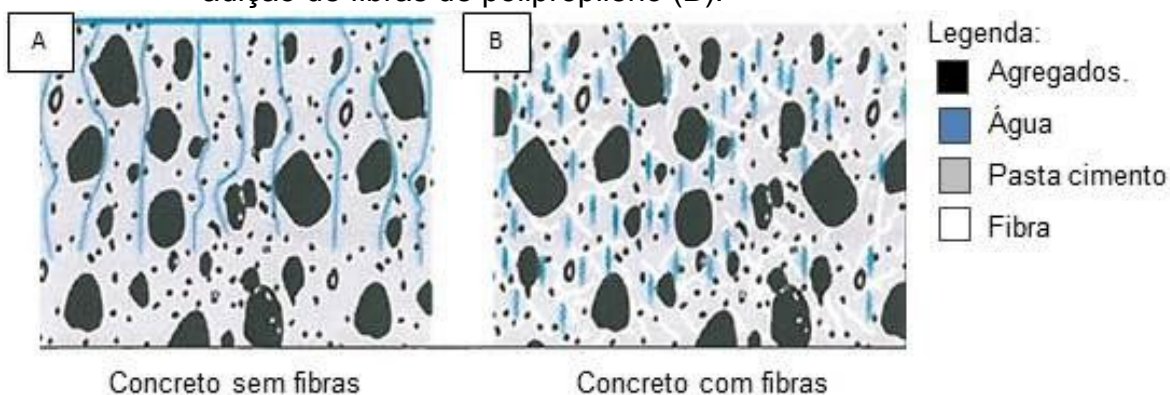
Fonte: Adaptado em 14/10/2019 de Fitesa *apud* Souza Filho (2012).

Embora o uso de fibras tenha significativa importância para o aperfeiçoamento das utilidades e propriedades do concreto, não evidenciam-se trabalhos relacionando a adição de fibras de polipropileno como reforço diretamente com a verificação do comportamento do fenômeno de carbonatação. Deste modo, é necessário para tal referencial adotar proposições acerca do comportamento que objetiva-se ser alcançado efetuando comparações entre comportamentos encontrados em diversos trabalhos, e aliando-os a fim de compreender como

comportar-se-ia um concreto com fibras de polipropileno submetido ao fenômeno de agentes agressivos, como por exemplo a carbonatação.

Para Fitesa *apud* Souza Filho (2012) o uso de fibras, além das características proporcionadas no seu estado endurecido, atribui às fibras o controle da exsudação da água no estado fresco do material, o qual é responsável por incorporar canais de saída de água do material o qual interfere na capacidade de penetração do material por agentes agressivos, na Figura 09 é possível evidenciar que a água exsudada da mistura deixa caminhos que promovem a penetração do material por agentes agressivos, ao passo que com a adição de fibras o concreto não desenvolve estes caminhos, mas mantém a água em seu interior promovendo ao material certa porosidade.

Figura 09 - Mecanismo de exsudação da água em concreto convencional (A). Mecanismo de combate à exsudação da água em concreto com adição de fibras de polipropileno (B).



Fonte: Adaptado em 14/10/2019 de Fitesa *apud* Souza Filho (2012).

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

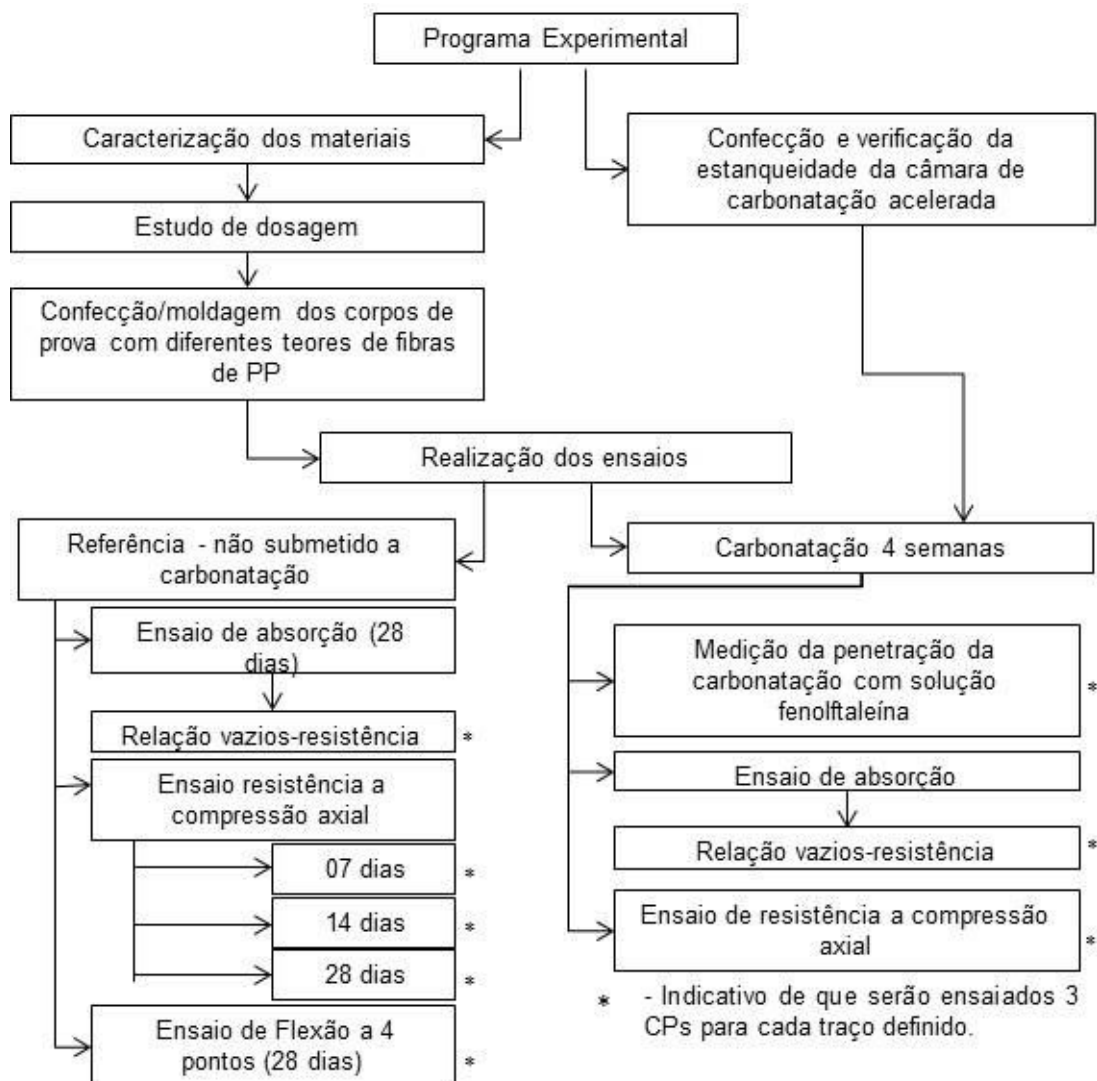
Para que seja possível atingir o objetivo principal deste estudo , foi realizado a metodologia abaixo descrito. Após o desenvolvimento desta, e obtenção dos resultados houve a comparação entre eles com intuito de estabelecer uma lógica para cada comportamento evidenciado.

#### **3.1 Estratégia de pesquisa**

O trabalho busca tornar possível a obtenção de dados suficientes para avaliar o comportamento da carbonatação acelerada em concretos com adição de fibras de polipropileno, deste modo, confeccionou-se uma câmara de carbonatação acelerada, de baixo custo, seguindo parâmetros de trabalhos de pesquisadores brasileiros (PAULETTI, 2009; LUCENA, 2016; COELHO, 2016). Haja visto que não há norma que defina como deve-se realizar testes de carbonatação acelerada, apenas normas que definem como deve-se efetuar a medição do fenômeno de carbonatação.

Para ter uma melhor visão do projeto, bem como conhecer a abrangência da pesquisa, faz-se necessário a representação, em forma de fluxograma, das atividades a realizadas no presente capítulo do trabalho. O fluxograma contido na Figura 10, relaciona a sequência de procedimentos que foram efetuados pelo discente durante a fase de elaboração.

Figura 10 - Organograma da realização das atividades de metodologia.



Fonte: do autor (2020).

Tendo em vista a avaliação do comportamento do fenômeno da carbonatação no concreto convencional, buscou-se variar as adições de microfibras de polipropileno em 0,1%, 0,5% e 1% em relação ao volume de concreto, e a partir de tal, foram obtidos dados para efetuar comparações entre as características físicas do concreto gerados através das diferentes concentrações de fibras adotadas.

### 3.2 Caracterização dos Materiais

Teve-se a necessidade de efetuar a caracterização dos materiais utilizados no traço a fim de delimitar suas características.

### 3.2.1 Cimento

Foi utilizado para a confecção dos corpos de prova o cimento CP V ARI RS, caracterizado conforme a Tabela 02. A opção de uso deste, está vinculada a formulação e a disponibilidade de mercado da região. Quanto a formulação devido a composição básica de clínquer e gesso, com pouca adição de material carbonático, variando de 0 a 5 percentual. Quanto à disponibilidade, os cimentos CP I são escassos, muitas vezes somente confeccionados em situações singulares de solicitação às cimenteiras.

Tabela 02 - Composição do cimento.

Tipo de cimento <i>Portland</i>	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100	-	-	-	NBR 5732
	CP I-S	99-95	-	1-5	-	
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	
Alto Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95		-	0-5	NBR 5733
Branco estrutural	CPB-25	100-75	-	-	0-25	NBR 12989
	CPB-32					
	CPB-40					
Branco não estrutural	CPB	74-50	-	-	26-50	

Fonte: adaptado em 31/08/2019 de ABCP, 2002.

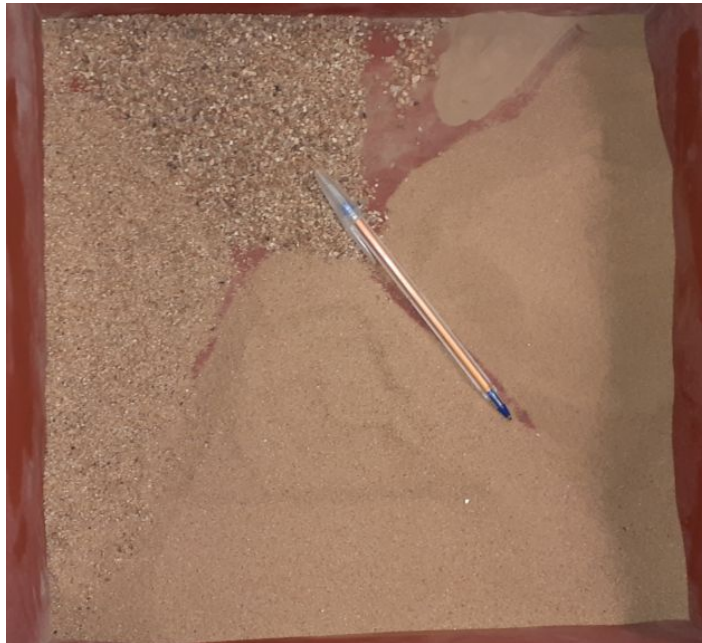
Para a definição e cálculo do traço, teve-se a necessidade da realização do ensaio a NBR 16605 (ABNT, 2017), no qual obteve-se uma massa específica de 2,97g/cm³ para o cimento a ser utilizado.

### 3.2.2 Areia

O agregado miúdo utilizado foi areia média de origem natural quartzosa disponibilizada pelo Laboratório de Tecnologia da Construção da Univates - LATEC. O agregado fornecido possui procedência da extração de leitos de corpos hídricos

da região. A caracterização do perfil do material para a obtenção da composição granulométrica, massa específica e umidade natural, foi realizado segundo o estipulado pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003b), NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR 9775 (ABNT, 2011a), respectivamente. Na Figura 11 está representada a segregação do agregado de acordo com o diâmetro do grão após realização do ensaio de granulometria.

Figura 11 - Areia média utilizada na dosagem.



Fonte: do autor (2020).

Para a curva granulométrica encontrou-se os resultados apresentados pela Tabela 03 e pelo Gráfico 02. Para o agregado miúdo foram encontrados valores de módulo de finura, umidade do agregado e massa específica de 1,90, 2,65% e 2,55g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

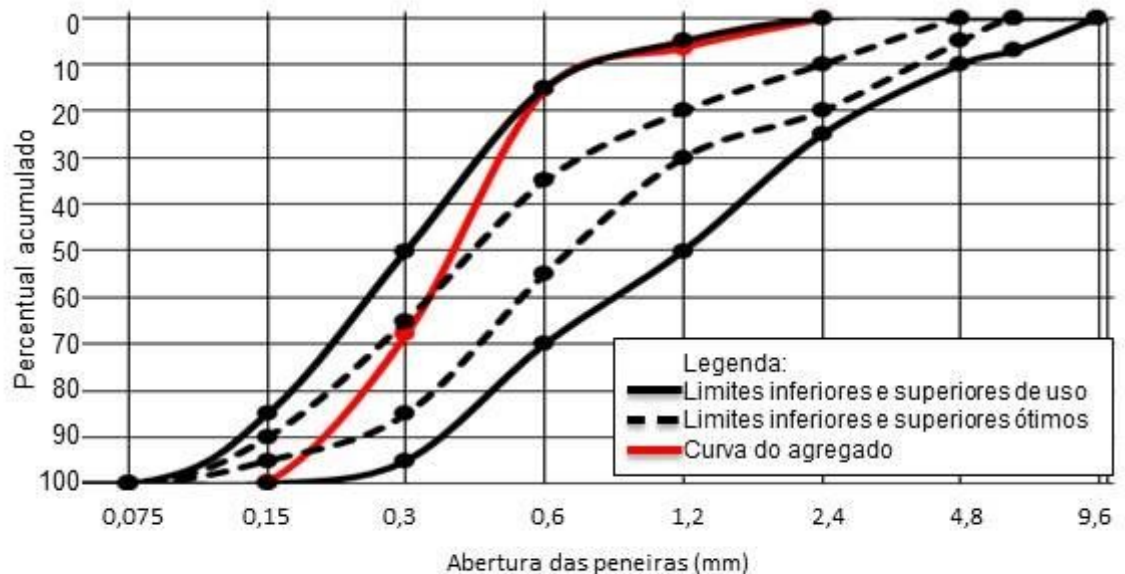


Tabela 03 - Composição granulométrica da areia utilizada na dosagem.

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	Material ensaiado	Massa retida acumulada (%)			
			Limites Inferiores		Limites Superiores	
			Zona útil	Zona ótima	Zona ótima	Zona útil
9,5	0,0	0,0	0	0	0	0
6,3	0,0	0,0	0	0	0	7
4,75	0,0	0,0	0	0	5	10
2,36	2,8	0,2	0	10	20	25
1,18	85,6	6,4	5	20	30	50
0,6	125,5	15,6	15	35	55	70
0,3	719,4	68,0	50	65	85	95
0,15	433,7	99,6	85	90	95	100
0,075	2,4	100,0	100	100	100	100
Fundo	3,0	100,0	100	100	100	100
Total	1372,4					

Fonte: do autor (2020).

Gráfico 02 - Composição granulométrica da areia utilizada na dosagem.



Fonte: do autor (2020).

### 3.2.3 Brita

O agregado graúdo utilizado foi brita 1 de origem basáltica disponibilizada pelo Laboratório de Tecnologia da Construção da Univates - LATEC. A caracterização do perfil do material para a obtenção da composição granulométrica, da massa unitária, da massa específica, e do determinação da umidade natural, foi realizado segundo o estipulado pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003b), NBR NM 45 (ABNT, 2006), NBR NM 53 (ABNT, 2003d) e NBR 9939 (ABNT, 2011b),

respectivamente. Na figura 12 está representada a segregação do agregado de acordo com o tamanho do particulado após realização do ensaio de granulometria.

Figura 12 - Brita 1 utilizada na dosagem.



Fonte: do autor (2020).

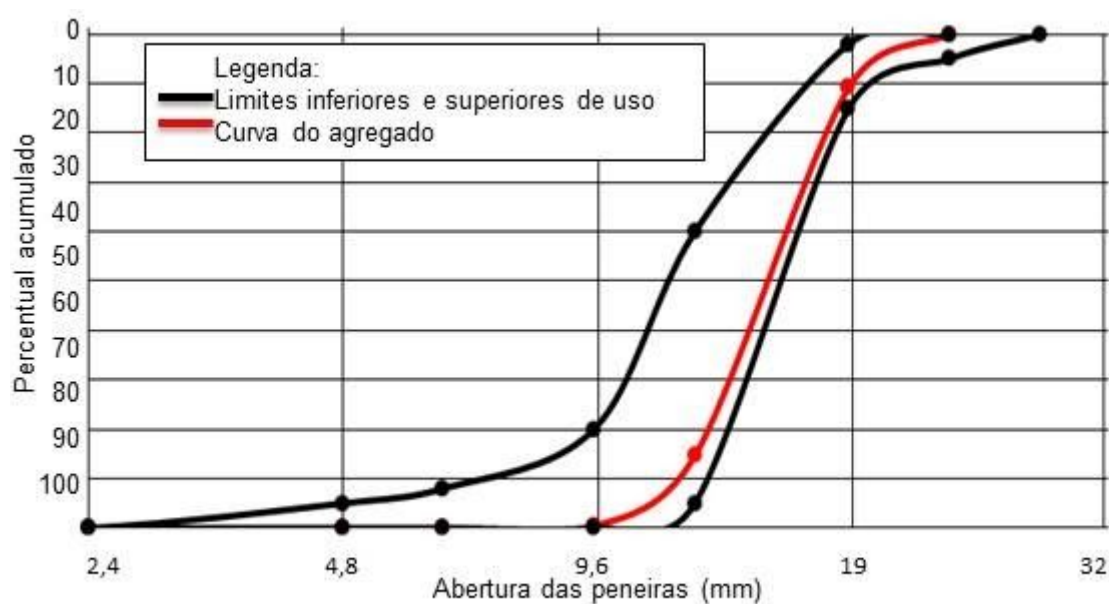
Para a curva granulométrica encontrou-se os resultados apresentados pela Tabela 04 e pelo Gráfico 03. Para o agregado graúdo foram encontrados valores de dimensão máxima do agregado, de massa unitária, de massa específica aparente, absorção de água e umidade do agregado de 19mm, 1,47g/cm<sup>3</sup>, 2,78g/cm<sup>3</sup>, 1,66% e 1,013%, respectivamente.

Tabela 04 - Composição granulométrica da brita utilizada na dosagem.

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	Massa retida acumulada (%)		
		Material ensaiado	Limites Inferiores	Limites Superiores
			Zona útil	Zona útil
32	0,0	0,0	0	0
25	0,0	0,0	0	5
19	167,96	10,8	2	15
12,5	1165,19	85,3	40	95
9,5	222,69	99,6	80	100
6,3	6,11	100,0	92	100
4,75	0,0	100,0	95	100
2,36	0,0	100,0	100	100
1,18	0,0	100,0	100	100
0,6	0,0	100,0	100	100
0,3	0,0	100,0	100	100
0,15	0,0	100,0	100	100
0,075	0,0	100,0	100	100
Fundo	0,2	100,0	100	100
Total	1562,15			

Fonte: do autor (2020).

Gráfico 03 - Composição granulométrica da brita utilizada na dosagem.



Fonte: do autor (2020).

Os valores limites de uso foram definidos de acordo com tipo de brita 1, em conformidade com a NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 2010).

### 3.2.4 Fibra

As fibras adicionadas no concreto são microfibras de polipropileno monofilamento, sendo que seu comprimento é de 12mm, e com diâmetro de 18 micrômetros. Entre as características mecânicas estão evidenciadas a capacidade de resistência a tração de 500 a 600 MPa, e possuem um peso específico aproximado de 0,90 gramas por centímetro cúbico. A Figura 05 representa as fibras utilizadas no presente trabalho.

Figura 13 - Fibra de PP monofilamento.



Fonte: do autor (2020).

As especificações do fabricante indicam um teor de 900g a 9000g de fibras por m<sup>3</sup> de concreto. As quantidades utilizadas no trabalho estão evidenciadas no item de dosagem.

### 3.2.5 Água

A água utilizada na mistura advém da rede de distribuição pública de Lajeado-RS, a qual é tratada e distribuída pela Companhia Riograndense de Saneamento - CORSAN.

### 3.2.6 Aditivo

A quantidade de fibras tende a promover perda da trabalhabilidade do concreto, contudo, ao adicionar outro material na mistura para melhor tal característica, como é o caso dos superplastificantes, seria necessário entender as alterações específicas que o mesmo causaria ao compósito frente ao fenômeno de carbonatação acelerada, deste modo, optou-se em não efetuar tal adição,

manifestando preferência em agitação mecânica quando o concreto não atingisse a trabalhabilidade necessária.

### 3.3 Dosagem

Com base nos dados obtidos na caracterização do material, e seguindo parâmetro de dosagem estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014), bem como utilizando o método ABCP de dosagem foi estipulado o traço do concreto a ser empregado nos ensaios, bem como incorporado a este as fibras de polipropileno do tipo monofilamentada, na condição de adição.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece que valores de resistência características mínimos e de relação água aglomerante máximas, de acordo com a classe de agressividade. Deste modo a fim de ser possível observar o fenômeno de carbonatação, adotou-se uma classe de agressividade moderada e assim, os valores de relação a/c máximo foi de 0,60 e a classe de resistência mínima de 25MPa. Para fins de cálculo do método ABCP de dosagem a classe de resistência de projeto adotada foi de 31,6MPa, corrigida conforme orientação do referido método. Inicialmente adotou-se uma relação a/c de 0,50, e no momento da dosagem do traço houve a necessidade de adição de água para que o traço tivesse a trabalhabilidade necessária, totalizando uma relação de água aglomerante de 0,55.

Atribuiu-se para o método valores de *slump test* de  $90 \pm 10$  mm, como sendo o mínimo para que seja possível de ser bombeável. Assim, com o valores de relação a/c, de resistência de projeto, de abatimento, de dimensão máxima do agregado, de massa específica do cimento, de massa específica da areia e massa unitária da brita foi possível de encontrar o traço do concreto a ser confeccionado pelo método ABCP. O traço definido foi de 1:1,5:3 com relação a/c de 0,55. Antes de definir a quantidade de areia foi considerado na mistura a umidade presente nesta a fim de adicionar ao traço a quantidade adequada de areia e de água.

Tendo em vista a variação da quantidade de fibras de PP ser necessária para compreender como é o comportamento do compósito diante do fenômeno de carbonatação, houve a nomenclatura de 4 traços, definidos conforme Tabela 05.

Tabela 05 - Composição dos traços.

Nomenclatura do traço	quantidade de fibras adicionadas em g/m <sup>3</sup>	Quantidade de fibras adicionadas em % do volume
0	0	0
1	900	0,1
2	4500	0,5
3	9000	1

Fonte: do autor (2020).

O traço 0 foi definido como o traço referência, ou seja, o que não tem adição de fibras, e ,portanto, serve como parâmetro de controle para avaliação se haverá benefícios propostos pela adição das fibras. Os demais traços seguem as recomendações dos fabricantes de acordo com os teores baixos, médios e altos das respectivas adições de fibras em concretos.

Durante a dosagem, para que todos os traços tivessem a mesma matriz cimentícia, efetuou-se a confecção do concreto suficiente para todos os corpos de prova cilíndricos em uma betoneira de capacidade de 400 litros, evidenciado na figura 14.

Figura 14- Dosagem do traço base para confecção dos corpos de prova.



Fonte: do autor (2020).



Para uma estimativa em massa foram estipulados para a dosagem 33 litros para cada traço, com uma majoração de 20% para o material aderido nos equipamentos e para a realização do *slump test*, assim, a estimativa em massa foi de 95kg de concreto para cada traço. O valor resultante para a confecção dos 4 traços de concreto foi de 190kg de brita, 96,1kg de areia, 62,56kg de cimento e de 31,8kg de água.

Durante a mistura na betoneira adotou-se uma ordem específica dos materiais, sendo colocada toda a brita seguida de aproximadamente 60% da água, posteriormente todo o cimento aos poucos, e após, toda a areia também inserida aos poucos, e, por último, o restante da água.

Após a mistura estar homogênea, foram pesados 95 kg e postos em betoneiras de capacidade volumétrica de 130 litros para que fosse efetuada a adição das fibras individualmente correspondente a cada traço. As fibras foram pesadas seguindo a proporção adotada conforme Tabela 03, adotado para tal valores de 35,6g, 178,1g e 356,25g para os traços 1, 2 e 3, respectivamente. A adição das fibras em cada betoneira foi realizada buscando deixar as fibras bem distribuídas, deste modo, com a mão, durante a sua adição, buscou-se separá-las esfregando os dedos contra a palma, esta ação está demonstrada na Figura 15.

Figura 15 - Separação das fibras e colocação das mesma em cada traço.



Fonte: do autor (2020).

Após a dosagem estar bem homogênea, aproximadamente 3 a 5 minutos de ciclos das betoneiras após a adição das fibras realizou-se o *slump test* para cada traço conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998), a realização do teste está demonstrado na Figura 16.

Figura 16 - Realização do *slump test*.



Fonte: do autor (2020).

Para a confecção dos corpos de prova foi realizada conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015), e durante a mesma, verificou-se que os valores encontrados pelo *slump test* para os traços 2 e 3, estavam baixos, deste modo optou-se pelo adensamento mecânico dos mesmos, o adensamento foi realizado em mesa vibratória, até que não se evidenciasse bolhas na superfície do corpo de prova. Para os traços 0 e 1 o adensamento pode ser de modo manual tendo em vista a trabalhabilidade adequada.

A dosagem dos CPs prismáticos seguiu a mesma metodologia dos adotados para os CPs cilíndricos, haja vista que o volume a ser dosado ser semelhante, apenas com uma majoração pouco menor na ordem de 17,3%, o que pode ser considerado dentro do aceitável.



A confecção dos corpos-de-prova - CPs - seguiu as quantidades definidas no fluxograma da Figura 10, deste modo, a quantidade total de corpos de prova confeccionados está descrita na Tabela 06.

Tabela 06 - Quantidades de CPs por dosagem.

Ensaio			Quantidade de CPs	Tipo do CP
Referência - não carbonatados	Resistência à compressão axial	07 dias	3	cilíndrico
		14 dias	3	cilíndrico
		28 dias	3	cilíndrico
	Absorção por imersão - seguido de rompimento à compressão para relação vazios resistência.		3	cilíndrico
	Flexão a 4 pontos		3	prismático
Carbonatados	Resistência à compressão axial		3	cilíndrico
	Absorção por imersão - seguido de rompimento à compressão para relação vazios resistência.		3	cilíndrico
	Penetração da carbonatação		3	cilíndrico
Total:		24 CPs (21 cilíndricos + 3 prismáticos)		

Fonte: do autor (2020).

Os CPs cilíndricos moldados tem a dimensão básica de 100mm e os CPs prismáticos a dimensão básica de 500mm, conforme NBR 5738 (ABNT, 2015).

Após a confecção dos CPs, os cilíndricos foram desmoldados após 24 horas da confecção, e os prismáticos em 48 horas, então foram encaminhados para a cura úmida, seguindo o estipulado pela NBR 5738 (2015).

### 3.4 Ensaios de controle mecânico

Foram adotados ensaios de controle para servir como método de comparação entre as amostras que foram submetidas ao ensaio de carbonatação, para que fosse possível efetuar comparações das características promovidas pelas diferentes adições de fibras no concreto que sofreria carbonatação.

#### **3.4.1 Resistência à compressão**

Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, seguindo o estipulado pela NBR 5739 (ABNT, 2007). O rompimento para verificação da resistência de cada dosagem foi realizado nas idades de 7, 14 e 28 dias. Em cada idade foram rompidos 3 CPs, e foi realizada média harmônica entre os resultados encontrados, os valores estão elucidados no capítulo de resultados.

#### **3.4.2 Flexão a 4 pontos**

Após a idade de 28 dias, foram rompidos os 3 CPs prismáticos de cada dosagem adotada, seguindo a norma NBR 12142 (ABNT, 2010), para comparativo da resistência entre as diferentes adições de fibras incorporadas ao concreto e a relação destas com a resistência do material, e foi realizada média harmônica entre os resultados encontrados, os dados estão apresentados no capítulo de resultados.

#### **3.4.3 Absorção por imersão e índice de vazios**

Foi verificada a absorção por imersão de 3 CPs de cada dosagem, seguindo os procedimentos estipulados pela NBR 9778 (ABNT, 2005). Nesta foi verificada a condição de porosidade do material, tendo em vista que os diferentes teores de adição de fibras de PP podem promover diferentes distribuições dos vazios, e com isso foi possível estipular parâmetros de comparação entre as diferentes dosagens e, inclusive, com as amostra submetidas ao ensaio de carbonatação.

#### **3.5 Carbonatação**

Para submeter os corpos-de-prova a ensaio de carbonatação acelerada, necessitou-se projetar e confeccionar uma câmara que possibilitasse a confecção do referido ensaio. Tendo em vista a inexistência de normas que definem o modo e os parâmetros para realização de ensaios de carbonatação acelerada, faz-se necessário consultas a trabalhos de acadêmicos que estabeleçam requisitos básicos de controle para que seja possível validar os resultados obtidos.

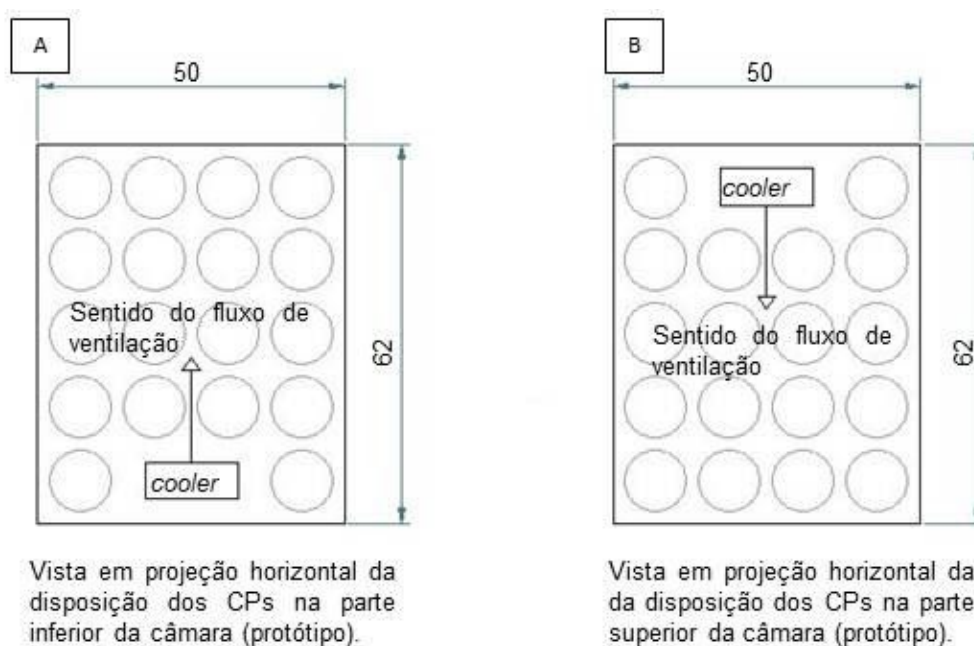
Com tal finalidade, e buscando parâmetros em trabalhos como os de Pauletti (2004), Pauletti (2009), Adorna (2016), Lucena (2016), Isaia (1999), Coelho (2016) e

Saldanha (2013) projetou-se um protótipo de uma câmara de carbonatação acelerada, com a finalidade de desenvolver a pesquisa do presente trabalho.

### 3.5.1 Confeccção do protótipo de câmara de carbonatação acelerada

Para que fosse possível efetuar o ensaio de todos corpos de prova como um só lote, e, deste modo, minimizando qualquer interferência promovida pela diferença entre a exposição dos CPs, foi confeccionada uma câmara que tivesse a capacidade para a totalidade de corpos de prova a ser ensaiado. Deste modo a Figura 17, esboça as dimensões mínimas que foram consideradas para concepção do protótipo de ensaio. Nesta está considerado o tamanho dos CPs cilíndricos com 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, sendo fornecida um espaço de 20 mm entre estes para promover o fluxo de fluido e, conseqüentemente, melhor dissipação do CO<sub>2</sub> dentro da câmara.

Figura 17 - (A) Croqui da disposição dos corpos de prova na parte superior do protótipo; (B) Croqui da disposição dos corpos de prova na parte superior do protótipo.

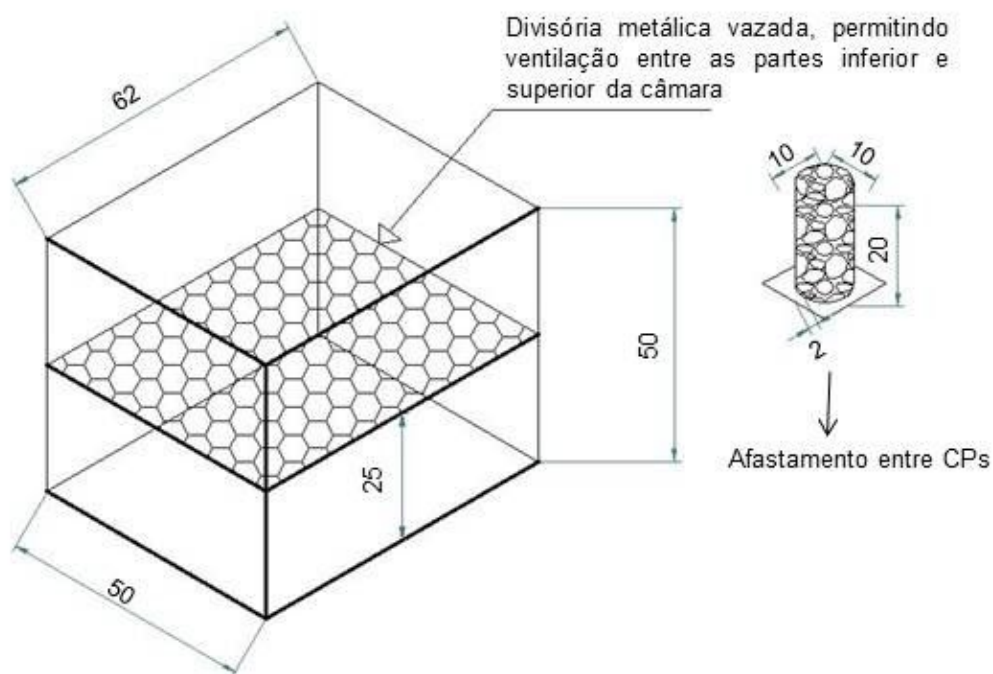


Fonte: do autor (2019).

Na Figura 18 é possível evidenciar as dimensões espaciais da câmara de carbonatação acelerada, sendo considerado o seu espaço interno de 50cm de

largura, comportando 4 CP, espaçados em 2 cm, por 62 cm de comprimento, comportando 5 CP, também espaçados em 2 cm. Observa-se com a ajuda da Figura 18, que para que seja possível comportar todos CPs como um lote, é necessário a divisão da câmara em dois compartimentos, inferior e superior, esta divisão é realizada por tela capaz de suportar o peso dos corpos-de-prova bem como ser vazada a fim de permitir a ventilação e dissolução do CO<sub>2</sub> igualmente nos compartimentos superiores e inferiores, com ajuda dos *cooler* que promovem o movimento de padrão circular dentro do protótipo.

Figura 18 - Croqui tridimensional do protótipo.



Fonte: do autor (2020).

Para que a câmara pudesse suportar o peso da distribuição dos CPs em seu interior, foi necessária a confecção da mesma em estrutura metálica, utilizando aço ASTM-A36 laminado de 1 polegada de largura, por 1/8 de polegada de espessura. Foram utilizados perfis do tipo cantoneira L e tipo T. Além disto o fundo e a porta foram confeccionados com chapa de aço denominada chapa de aço fina quente, de espessura de 2,65 mm. É possível vislumbrar a estrutura da câmara na Figura 19.

Figura 19 - Estrutura metálica do protótipo.



Fonte: do autor (2020).

Após a estrutura estar confeccionada, foram postos vidros recozidos de 6mm e nos vãos da estrutura e vidros temperados de 8mm de espessura nos vidros que tiveram que ser feitos orifícios para fixação de equipamentos de controle do protótipo. A opção pelo uso de perfis cantoneiras foi necessária para que pudessem ser fixados os vidros com uso de silicone de cura acética, o posicionamento da colagem das placas de vidro está demonstrado na Figura 20, após fixada o vidro aguardou-se 48 horas para secagem completa. A colagem sempre foi realizada com a face a ser colada para baixo em benefício da gravidade, e para auxiliar na fixação eram colocados aproximadamente 10 kg para auxiliar na colagem evitando deixar nenhuma fresta, com intuito de garantir a estanqueidade do protótipo.

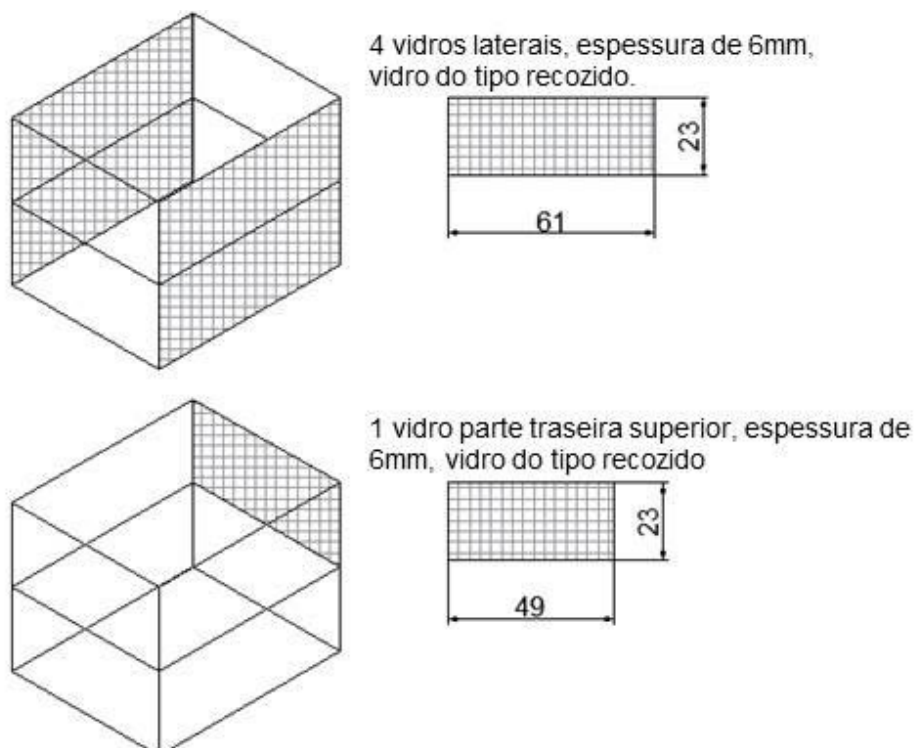
Figura 20 - Fixação dos vidros de vedação com uso de silicone.



Fonte: do autor (2020).

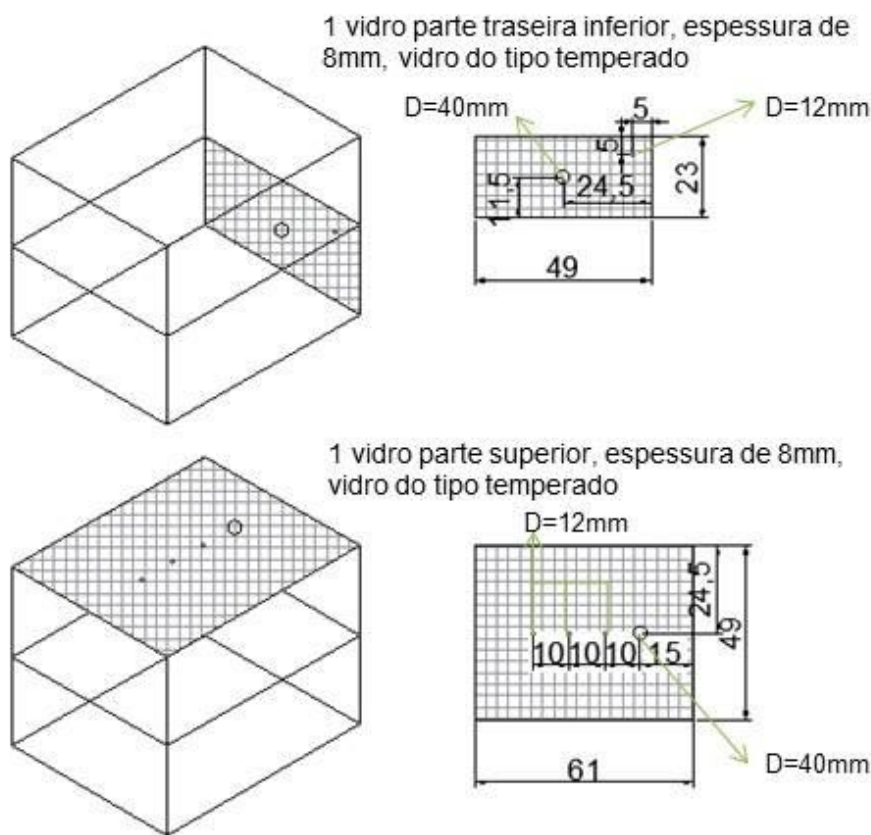
A quantidade, dimensões e a localização de instalação dos vidros que são recozidos e os que são temperados estão relacionados nas Figuras 21 e 22, respectivamente.

Figura 21 - Croqui das chapas de vidro recozido utilizadas no protótipo.



Fonte: do autor (2020).

Figura 22 - Croqui das chapas de vidro temperado utilizadas no protótipo.



Fonte: do autor (2020).

Após transcorrido o tempo necessário para a secagem da fixação dos vidros, foi utilizado o mesmo material para a colocação de tubo latex cirurgico na interface entre a porta e o batente da mesma a fim de garantir a vedação do protótipo.

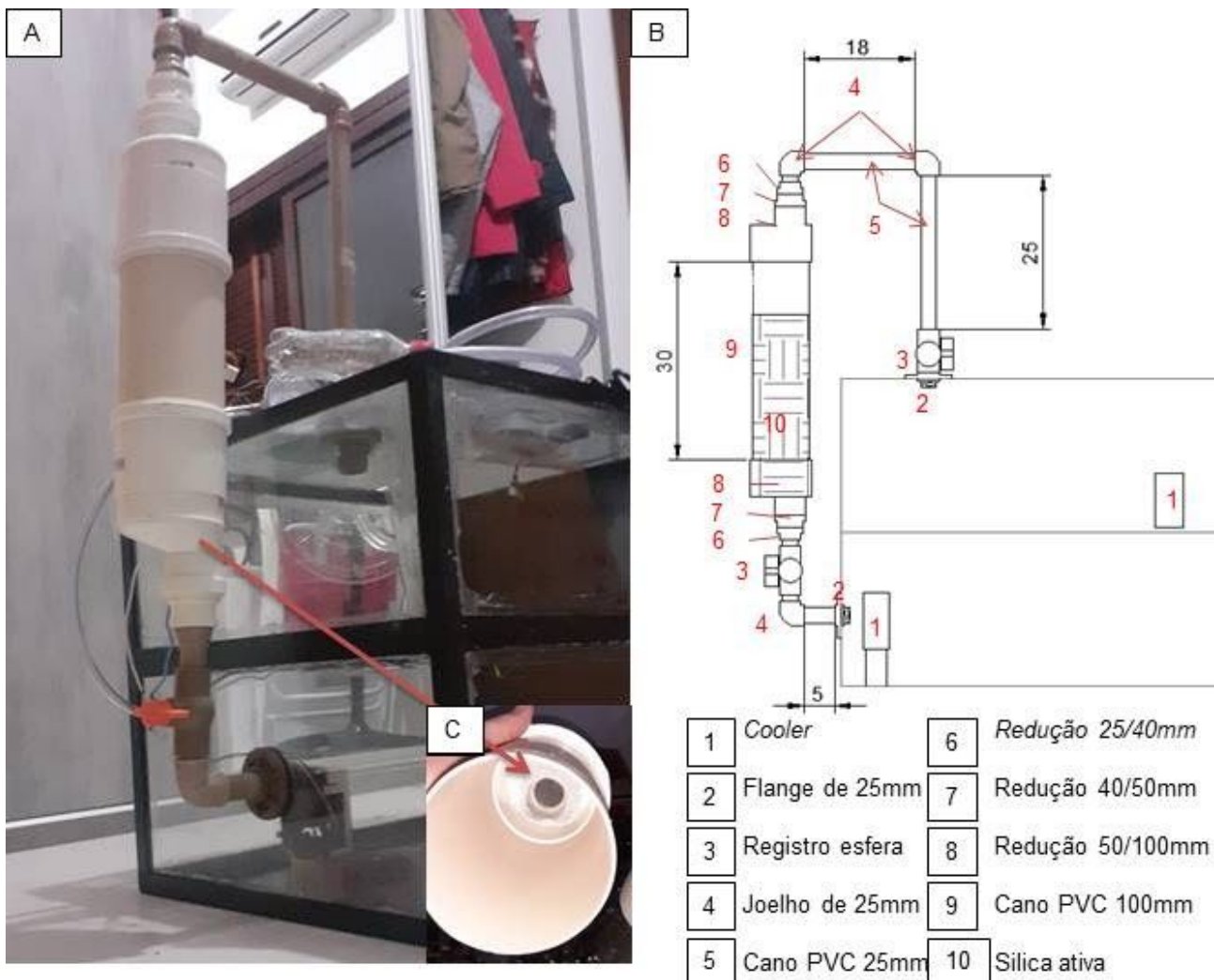
Volvido 48 horas as borrachas de látex da porta do protótipo já estavam afixadas, e foi possível a adição dos componentes de controle do ensaio, deste modo, foram afixados uma válvula de pneu no furo de diâmetro de 8mm da parte superior, e um manômetro de baixa pressão para refrigeração de modelo GT-134L para teste da estanqueidade do protótipo. A fixação do manômetro foi realizada com auxílio de mangueira pvc crista de ¼ de polegada, a qual foi posta no orifício de 12mm de diâmetro na vidro da parte posterior da caixa. Juntamente neste orifício passou-se os cabos de alimentação dos *coolers* que proporcionam um movimento cíclico dos fluidos dentro do protótipo a fim de garantir uma distribuição regular de umidade e de dióxido de carbono na câmara. Foi utilizada uma fonte de computador

adequada para proporcionar alimentação de 12 Voltz para os *coolers*, a qual foi ligada diretamente na rede da concessionária de energia.

No protótipo ainda foi utilizado um termohigrômetro com sensor externo, com precisão de medição de umidade de  $\pm 3\%$  e de temperatura de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . O sensor do termohigrômetro foi posicionado no interior da câmara pelo orifício de 8mm na parte superior da câmara. Nos furos de 40mm foram posicionadas flanges de 25mm, e nestas foram acoplados registros do tipo globo seguidos de um aumento gradativo da bitola do cano até atingir diâmetro de 100mm, e neste foi inserido 1,5 kg de sílica ativa seca para que fosse efetuada a secagem controlada da câmara caso a reação para geração de  $\text{CO}_2$  extrapolasse o valor de controle de 75%. O mecanismo de secagem está representado na Figura 23.



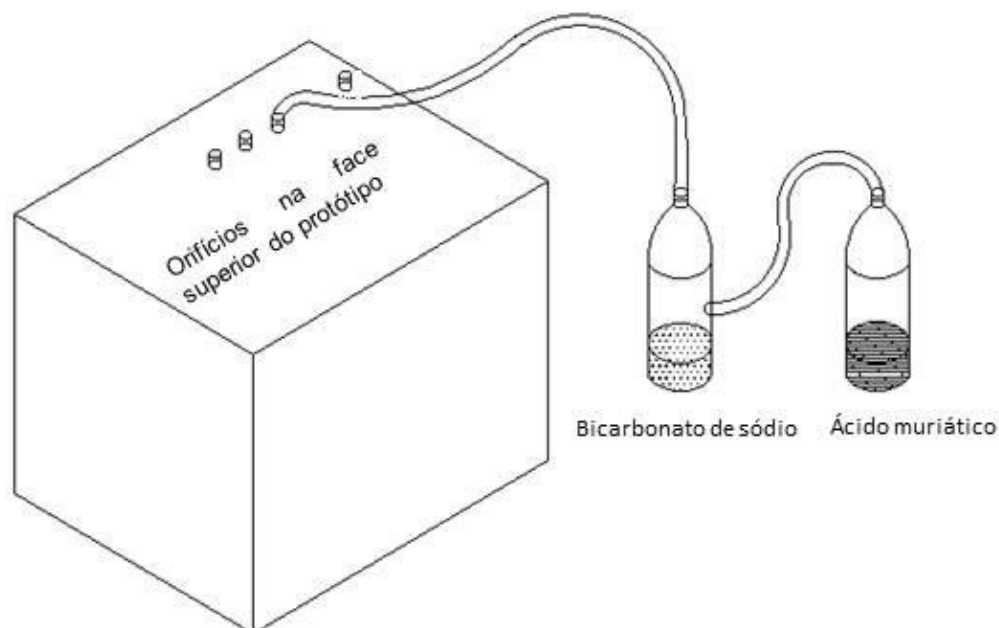
Figura 23 - Mecanismo de desumidificação (A). Croqui do mecanismo de desumidificação do protótipo (B). Detalhe interno ao cano PVC de 100mm, com tela de nylon para reter a sílica ativa (C).



Fonte: do autor (2020).

O mecanismo de obtenção da dióxido de carbono, para que seja mantida a concentração constante no sistema, teve que promover a reação química somente após o sistema estar estanque, para que fosse possível controlar a concentração de  $\text{CO}_2$  dentro da câmara, sem considerar perdas da produção calculada. Para tal faz-se uso do esquema da Figura 24, que consiste em pôr os reagentes de modo que não estejam em contato, e só iniciem a reação após a vedação completa do protótipo, este sistema foi confeccionado com garrafas Pet, de 250ml e tubos de PVC cristal de  $\frac{1}{4}$  de polegada de diâmetro, posto no orifício superior do protótipo de 12mm de diâmetro.

Figura 24 - Sistema de reação para obtenção de  $\text{CO}_2$ .

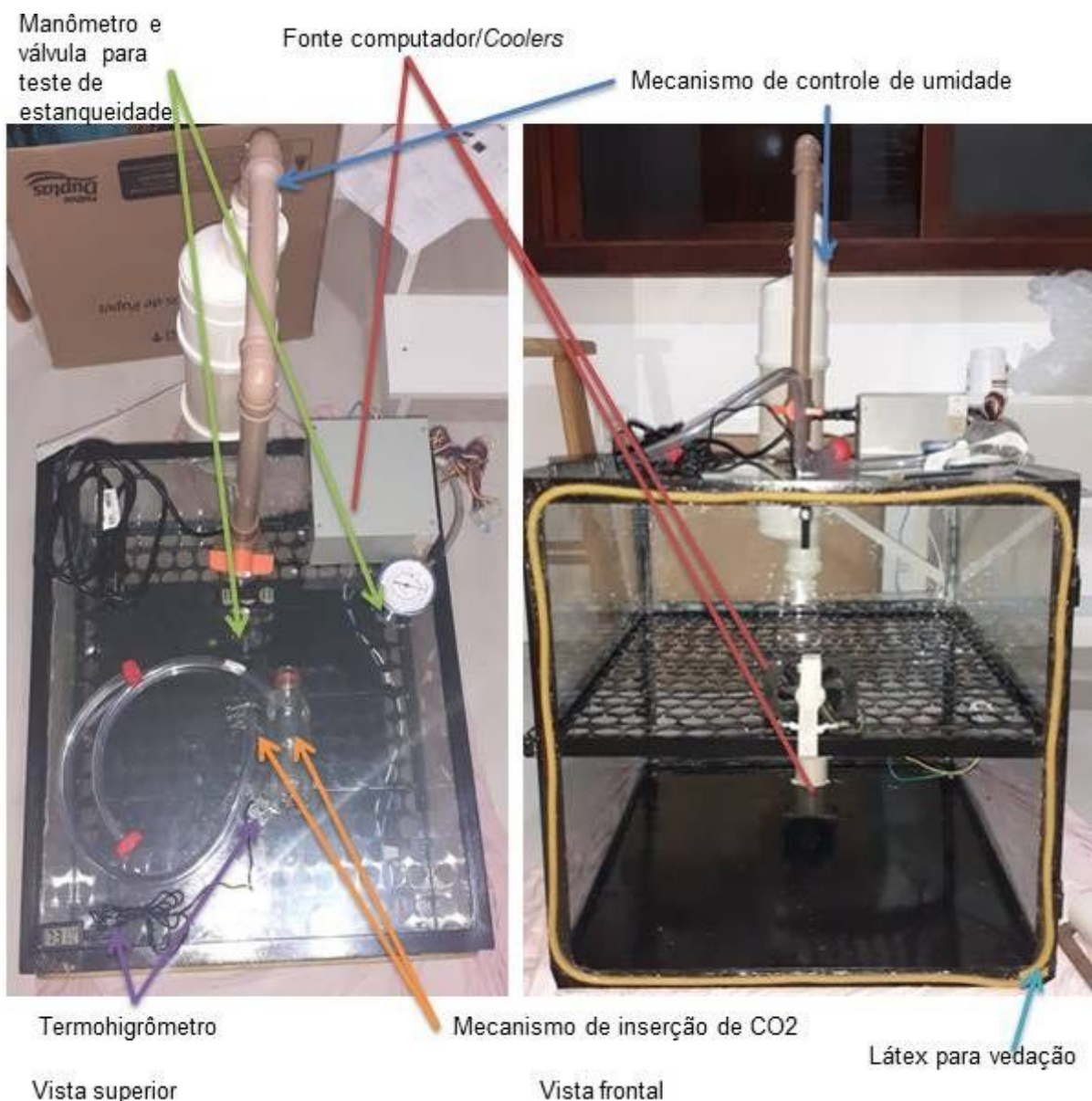


Fonte: do autor (2020).

Após vedado o sistema se eleva o recipiente do ácido muriático, derramando-o no recipiente de bicarbonato lentamente, iniciando a reação, a qual distribui o  $\text{CO}_2$  produzido para a câmara, por meio do equilíbrio de concentração dos ambientes. A cada 7 dias era realizada a pesagem dos reagentes e novamente realizada a reação para manter os níveis de dióxido equilibrados. Era retirado por um breve período o mecanismo de desumidificação para renovação do ar no ambiente interno da câmara, sem necessitar abrir a câmara, após fechava-se o registro, ligava-se novamente o mecanismo de desumidificação e realizava-se novamente a reação para obtenção do  $\text{CO}_2$  em concentrações definidas.

A adição de todos equipamentos de controle do ensaio está representada na Figura 25. É possível ver cada equipamento e sua instalação, que teve que ser efetuada com uso de silicone de cura acética a fim de garantir que o mecanismo de carbonatação ficasse estanque, sem sofrer perda do  $\text{CO}_2$  para o ambiente externo.

Figura 25 - Protótipo com todos equipamentos de controle instalados.



Fonte: do autor (2020).

Deste modo, antes de utilizar a câmara, foi verificada a estanqueidade do protótipo, pressurizando-se a câmara com aproximadamente 3 psi, com uso de uma bomba pneumática conforme Figura 26, onde foi verificada a estanqueidade da mesma durante um período de 12 horas. Com o manômetro já instalado foi possível verificar a perda de pressão, a mesma foi mínima, o que garantiu que a câmara foi estanque à pressão do trabalho, que será muito baixa, sendo praticamente nula.

Figura 26 - Bomba pneumática utilizada para pressurização da câmara.

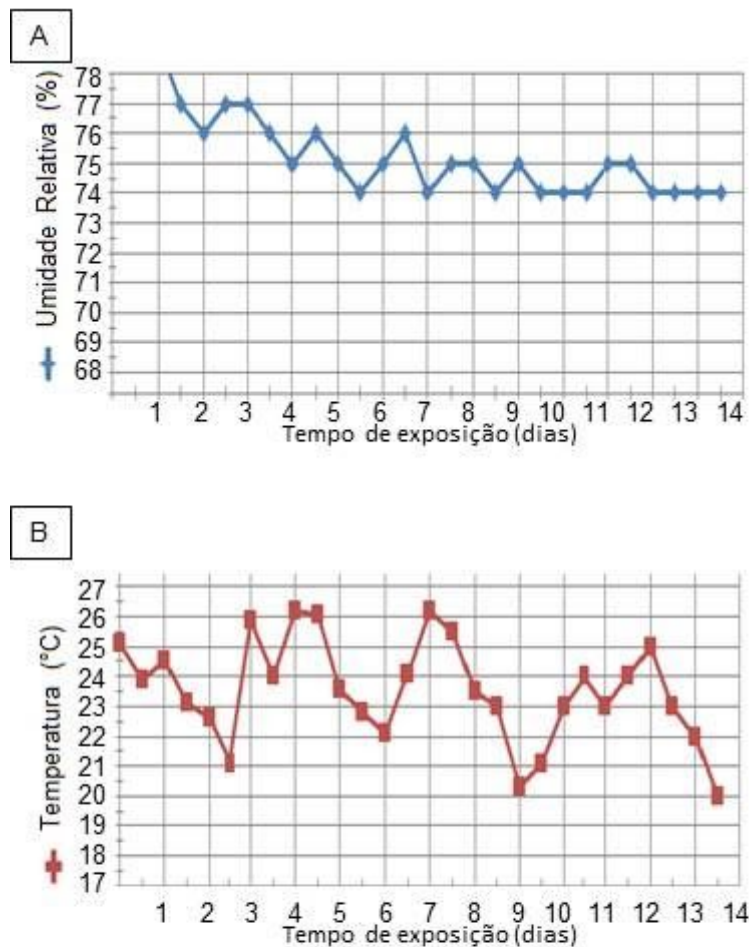


Fonte: Do autor (2020).

### 3.5.2 Preparação das amostra para ensaio de carbonatação acelerada

Após os 28 dias de idade os CPs foram retirados da câmara úmida e sofreram uma secagem de 12 horas em estufa a 50°C, seguidos de 24 horas em estufa a 105°C, após isto foram retificados em ambas secções circulares para desconsiderar as áreas expostas, e no mesmo dia postos no protótipo da câmara com umidade constante de  $75 \pm 3\%$  e temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , onde ficaram por 2 semanas para que atingissem equilíbrio de umidade interna, este prazo foi orientado pelo trabalho de GOMES *et. al. apud.* SALDANHA (2013). A umidade da câmara foi elevada até 80% com utilização de ferro de passar a vapor e posteriormente foi utilizado o sistema de desumidificação deixando os registros abertos até atingir 76%, aí então efetuou-se o fechamento dos registros e a umidade permaneceu dentro dos parâmetro durante estas 2 semanas de pré condicionamento. A temperatura do ambiente foi mantida pois o protótipo ficou em ambiente interno a uma residência, em um cômodo pequeno da mesma, com ar-condicionado ligado para manter a temperatura constante durante o período de pré condicionamento. Diariamente foram feitas leituras da temperatura e umidade a fim de traçar um perfil de exposição das amostras, o qual está representado no Gráfico 04. A leitura ocorria 2 vezes por dia, no horário compreendido entre as 12 horas e as 14 horas e outra no horário compreendido entre as 22 horas e as 00 horas.

Gráfico 04 - Perfil de exposição das amostras durante pré condicionamento.



Fonte: do autor (2020).

Antes da colocação das amostras na câmara para regulação da umidade e pré condicionamento foi definido que para cada traço, 3 corpos de prova teriam medidas a profundidade de carbonatação mensuradas, assim, tendo em vista que os CPs cilíndricos têm faces regulares circulares efetuou-se a pintura das laterais dos cilindros antes do pré condicionamento, a fim de que a carbonatação tivesse apenas uma frente de carbonatação, não sofrendo influência das demais faces, assim ao efetuar as leituras de carbonatação pela norma CPC-18 da RILEM (1988) é desconsideradas as influências de o formato da peça pode ocasionar no ensaio. A pintura das laterais dos CPs foi efetuada com pincel com cerdas sintéticas e com duas demãos cruzadas de tinta PU (poliuretano) do tipo bicomponente, os mesmo permaneceram secando durante 12 horas, o resultado da pintura está demonstrado na Figura 27.



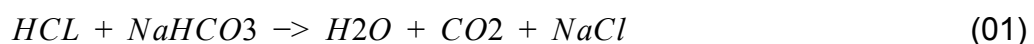
Figura 27 - Pintura das laterais dos corpos de prova.



Fonte: do autor (2020).

Somente após tal condicionamento de duas semanas é que foi efetuada a mistura dos reagentes gerando  $\text{CO}_2$  para a câmara de carbonatação, na qual os CPs permaneceram por 4 semanas, de modo que componham um só lote, 9 corpos-de-prova de cada dosagem, deste modo totalizando 36 CPs que foram submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada.

A carbonatação foi promovida pela reação química entre ácido e base. O ácido utilizado é o HCl de baixa concentração, encontrado comercialmente como ácido muriático, a concentração da solução encontrada foi de 16%. A base a ser considerada na mistura foi o bicarbonato de sódio,  $\text{NaHCO}_3$ , que foi facilmente encontrado no comércio local. Para que fosse possível verificar atingir a concentração de  $6 \pm 1\%$ , foi calculado o volume aproximado da câmara de carbonatação e dos dutos e recipientes que esta possui, subtraindo-se o volume dos CPs, que resultou em 103,85 litros. Para tal, foi considerada a equação abaixo.



Percebe-se na equação que 1 mol de HCl e 1 mol de  $\text{NaHCO}_3$  geram especificamente 1 mol de  $\text{CO}_2$ , deste modo, ao considerar as massas molares de cada um percebe-se que 84 g de  $\text{NaHCO}_3$  (1 mol) adicionados a 36,5 g HCl (1 mol) geram 22 g de  $\text{CO}_2$  (1 mol), que ocupa 22,4 litros em condições naturais de temperatura e pressão. Conhecendo o volume da câmara como sendo 103,85 litros e o volume que o gás carbônico deve ocupar, que é 6% de 103,85, resultando em

6,23 litros, é possível estipular por regra de três simples a massa necessária de cada reagente. Foram separados em balança de precisão 23,366 g de bicarbonato e 63,457 g de solução de ácido muriático, devido a concentração de HCl ser apenas de 16%. A pesagem utilizando balança de precisão está demonstrada na Figura 28.

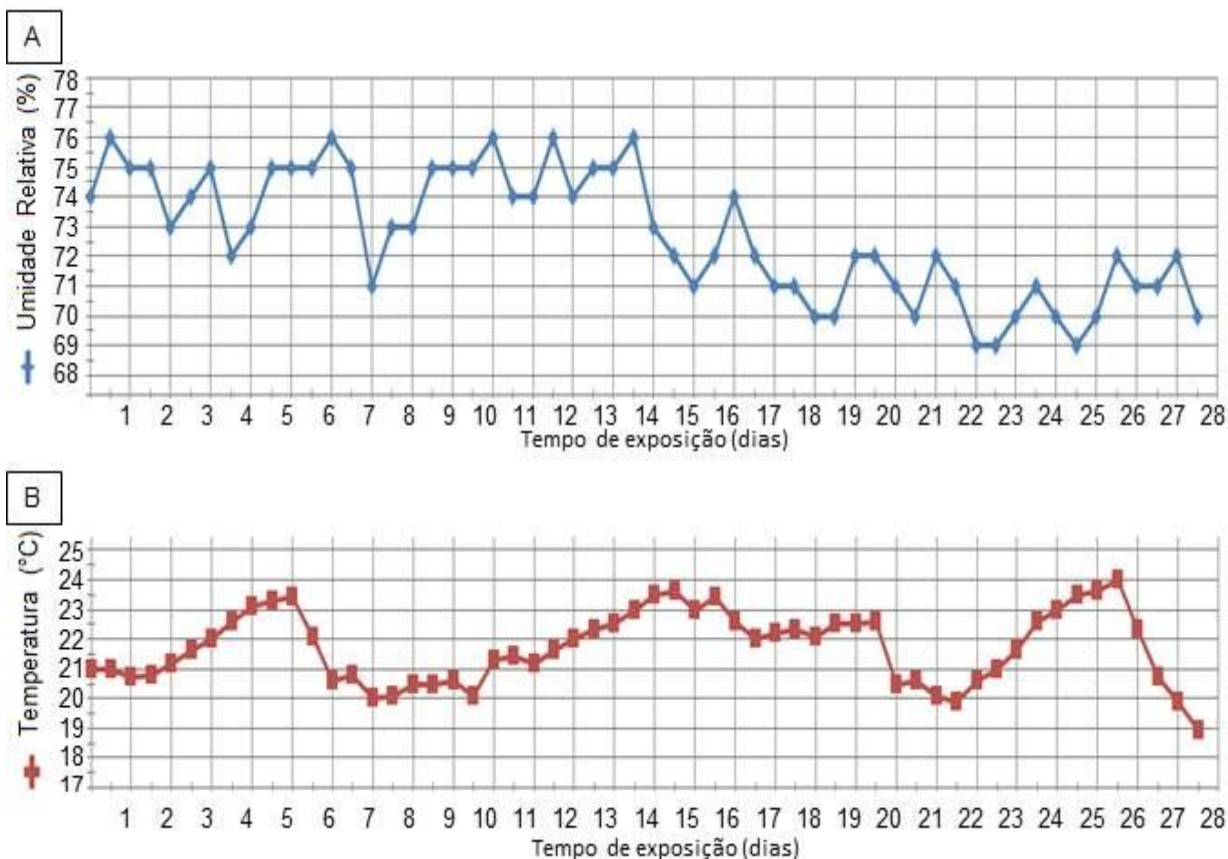
Figura 28 - Pesagem dos Reagentes.



Fonte: do autor (2020).

Diariamente foram aferidos os valores de temperatura e umidade de acordo com as leituras do termohigrômetro após a reação dos reagentes. A leitura ocorria 2 vezes por dia, no horário compreendido entre as 12 horas e as 14 horas e outra no horário compreendido entre as 22 horas e as 00 horas. O perfil de exposição sofridos pelos CPs está demonstrado no Gráfico 05.

Gráfico 05 - Perfil de exposição das amostras durante ensaio de carbonatação acelerado.



Fonte: do autor (2020).

### 3.5.3 Resistência à compressão

Após serem submetidos ao ensaio de carbonatação, foi verificada a resistência a compressão dos corpos de prova cilíndricos de cada traço, bem como realizada média harmônica entre os valores a fim de ver se houve alterações nas resistências das amostras após o ensaio de carbonatação acelerada e se a adição das fibra proporcionou alguma alteração nestas, além de relacionar com a profundidade de carbonatação aferidas para cada traço. Foram ensaiados 3 CPs para cada dosagem adotada, similar ao das amostras não carbonatadas, a única divergência que impediu que fosse realizada comparação direta entre os valores das amostras carbonatadas e as não carbonatadas são as idades diferentes entre os CPs.



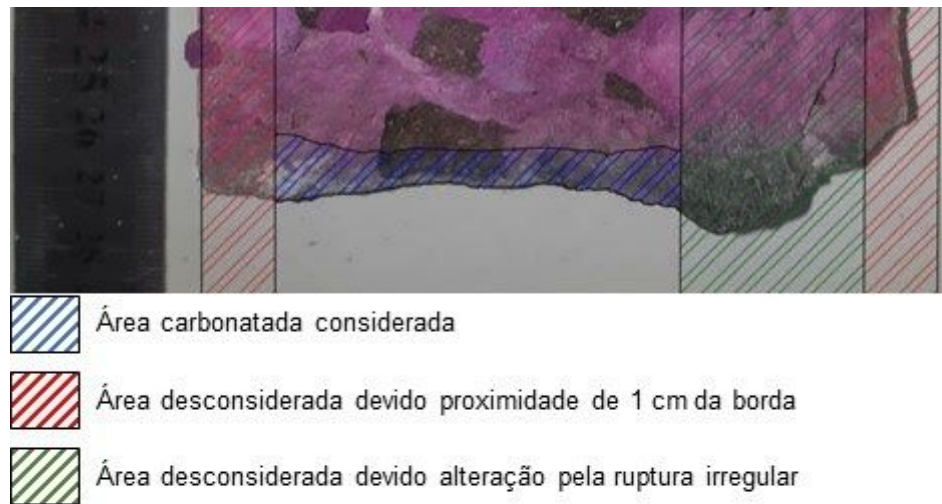
### 3.5.4 Medição da penetração da carbonatação na peça

Após realizado o ensaio de carbonatação, foram destinados os 3 CPs de cada dosagem que possuíam as laterais pintadas para serem seccionados em sua maior dimensão, com o uso de prensa hidráulica por compressão diametral, para que assim fosse possível efetuar medições da penetração que a carbonatação teve em cada tipo de dosagem, e com isso, verificar se as diferentes adições de fibras modificam o comportamento de penetração da carbonatação, desencadeando a redução do pH do material.

Imediatamente após a secção das amostras, com uso de borrifador tipo *spray* convencional distante aproximadamente 20 cm da área de aplicação, foi aspergido solução contendo 1% de fenolftaleína e 99% de veículo (composto por 70% álcool etílico e 30% água destilada), conforme orientação do CPC 18 (RILEM, 1988), que tinge de coloração avermelhada o que estiver com pH acima de 8,3, indicando os locais onde não ocorreu a carbonatação do concreto. Nos locais onde a amostra atingiu pH superior, mas próximo a 8,3, observou-se coloração menos intensa, e, considerando que indicativos de pH inferior a 9 já são suficientes para a carbonatação foram considerados para medição.

Após borrifada, aguardou a secagem das áreas de avaliação dos CPs, cerca de 1 minuto, e foram retiradas fotos com câmera de resolução 9 Megapixels todas a uma altura de 35 cm medida de modo ortogonal a superfícies de exposição das amostras. Após registradas as imagens foi utilizado *Software* do tipo CAD - *computer-aided design*, traduzido como desenho auxiliado por computador, para que fossem postas em escala as imagens e, com uso deste, traçado os pontos que a profundidade de redução do pH conseguiu atingir, a fim de delimitar as áreas carbonatadas desconsiderando as margens adjacentes as laterais em 1 cm para que não houvesse influência das frentes de penetração não alinhadas, bem como desconsiderou-se também as áreas que a ruptura à compressão diametral danificou a região a ser analisada. A Figura 29 demonstra os parâmetros adotados para a análise.

Figura 29 - Reação fenolftaleína com pH alcalino e condicionantes de análise.



Fonte: do autor (2020).

Assim, para medição da profundidade de carbonatação dentro da área a ser avaliada, criou-se linhas ortogonais ao sentido da face exposta espaçadas em 2 mm, a fim de medir o valor médio de penetração da carbonatação.

No dia do procedimento as condições ambientais do local estavam adequadas às indicações da RILEM (1998), sendo para tal uma temperatura aproximada de 20°C e umidade relativa de 70 ± 5%.

### 3.5.5 Absorção por imersão

Retirados as amostras do protótipo, após findado o ensaio de carbonatação acelerada, foi verificada a absorção por imersão de 3 CPs de cada dosagem, seguindo os procedimentos estipulados pela NBR 9778 (ABNT, 2005). Foi verificada a condição de porosidade do material, buscando enfatizar o ocorrido com as amostras após a carbonatação, relacionando-as com as amostras não carbonatadas. Após a absorção por imersão efetuou-se o rompimento à compressão axial, a fim de avaliar a influência direta que as distribuições da porosidade e da carbonatação promovem na resistência, correlacionando os resultados encontrados para cada ensaio.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a realização do presente trabalho, evidenciar-se-iam situações que julgavam-se ser importantes de serem feitas considerações, pois, de certo modo, delimitaram os resultados ou sua obtenção.

### 4.1 Trabalhabilidade

Durante a dosagem não foram evidenciados fenômenos de segregação nem mesmo exsudação nos CPs, e os valores de abatimento para o *slump test* para cada traço estão referenciados na Tabela 7.

Tabela 07 - Indicativos de trabalhabilidade de cada traço.

traço	adição de fibras (%)	abatimento (mm) – <i>slump test</i>
0	0	110
1	0,1	115
2	0,5	30
3	1	5

Fonte: do autor (2020).

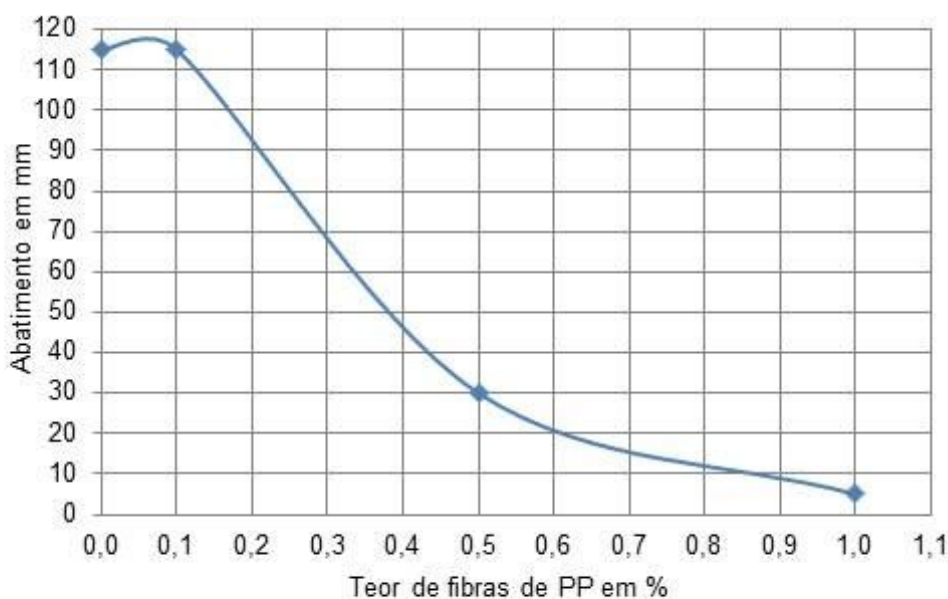
Conforme características iniciais de dosagem, a previsão estimava um valor de abatimento no ensaio *slump test* de  $90 \pm 10$  mm, como condicionante de ser o mínimo para ser bombeável. Após a dosagem percebeu-se que os traços 0 e 1 estavam dentro do esperado para a NBR 8953 (ABNT, 2015), para condição de concreto bombeado para estruturas, com lançamento convencional, dito na classe S100, com abatimento acima de 100mm.

Não é possível de afirmar que o traço com o teor mínimo de fibras, traço 1, possui maior trabalhabilidade que o traço 0 pois os valores são muito próximos, e, isto pode ser influência da execução do teste. Portanto a adição de fibras, em

mínimas quantidades, não afeta a trabalhabilidade do concreto, e pode ser considerada como mantida a sua capacidade de adensamento se comparada ao concreto sem fibras.

Para os traços 2 e 3 o emprego em estruturas, por meio de bombeamento, seria impróprio, devido a sua trabalhabilidade ser muito reduzida, o que sugere que deve ser empregado uso de aditivos, como o do tipo superplastificantes, nestas dosagens. No presente trabalho teve que ser utilizado adensamento mecânico para estes traços, devido sua capacidade de adensamento ser muito baixa, evidenciada pelo abatimento no *slump test*. Percebe-se que conforme aumenta-se o teor de fibras, de 0,5% a 1%, há efetiva redução da trabalhabilidade, bem como estima-se que para os teores entre 0,1% a 0,5% o concreto adote o mesmo comportamento, ou seja, tenha uma redução da trabalhabilidade conforme aumenta-se o teor de fibras da mistura. Com base nos dados do ensaio fez-se a estimativa do abatimento com base no teor de fibras contida no Gráfico 06.

Gráfico 06 - Indicativos de trabalhabilidade relacionado com teor de fibras.



Fonte: do autor (2020).

Para Gráfico 06 foi considerado como se o *slump test* do traço sem adições fosse igual ao do traço 1, pois não há como considerar que a referida adição

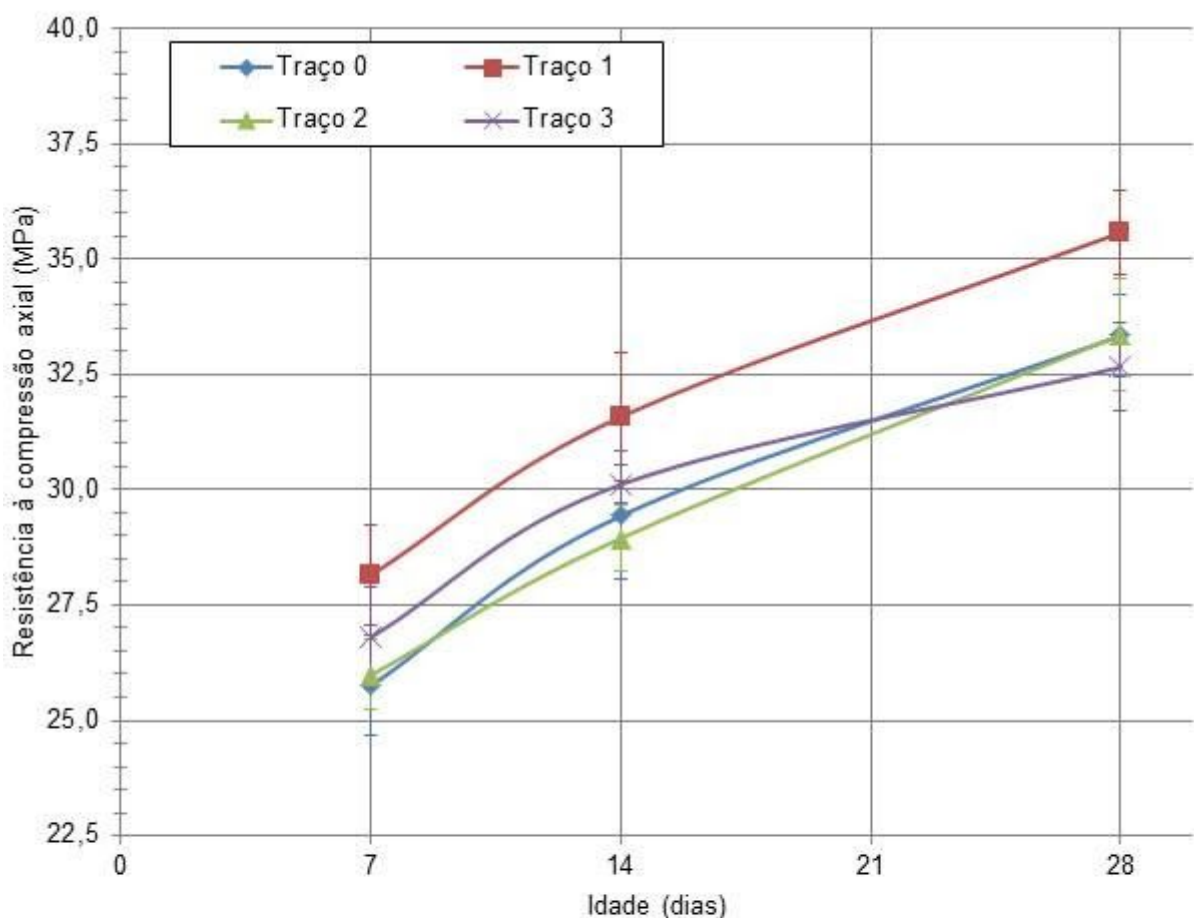
promove aumento da trabalhabilidade, e portanto, a variação promovido é advinda da realização do ensaio, e está dentro das variações de  $\pm 10\text{mm}$ .

## 4.2 Ensaios de controle mecânico

### 4.2.1 Resistência à compressão e à flexão

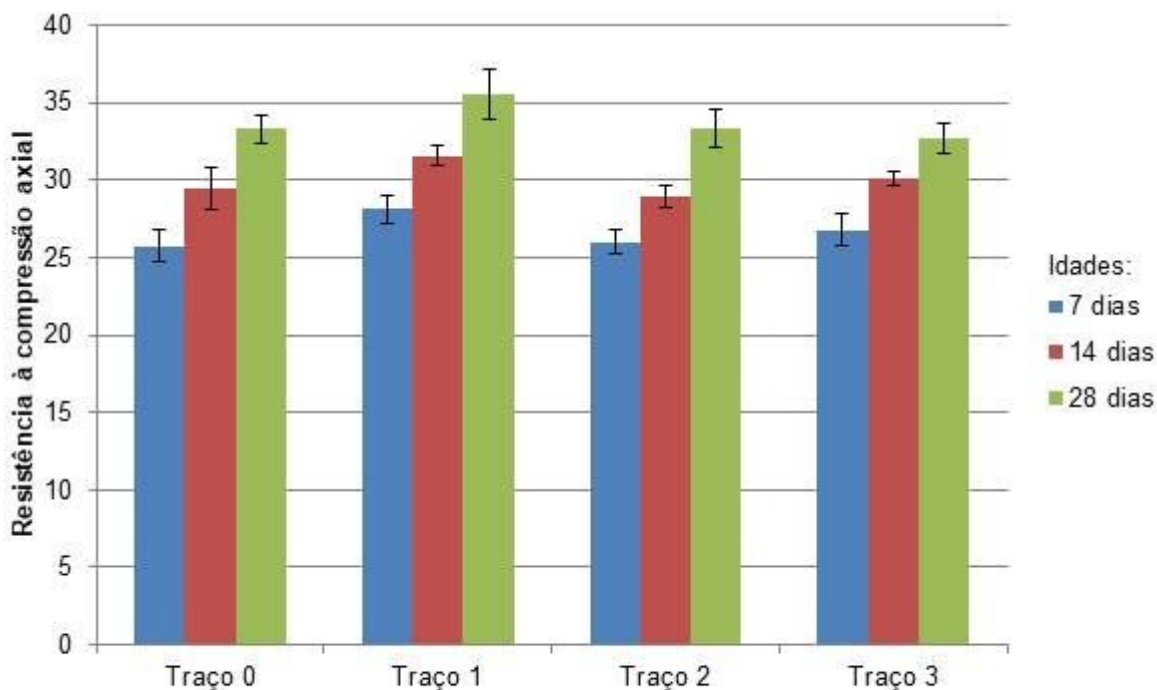
Após a cura úmida, houve o rompimento das amostras cilíndricas com as idades de 7, 14 e 28 dias e das prismáticas com idades de 28 dias os resultados obtido para as médias das resistências encontradas para os CPs cilíndricos estão apresentados no Gráfico 07 e 08, e os prismáticos apresentados no Gráfico 10, juntamente com os desvios encontrados.

Gráfico 07 - Valores de resistência à compressão por idade em comparativo.



Fonte: do autor (2020).

Gráfico 08 - Valores de resistência à compressão por traço.



Fonte: do autor (2020).

O traço sem adição de fibras, se considerado como traço referência para as características adotadas pelas fibras, fornece a noção de adições em pequenas quantidades proporcionam um incremento na resistência média dos corpos-de-prova. Os traços 2 e 3 possuem uma leve redução de sua resistência se comparados ao mesmo traço. Isto ocorre pois as fibras em pequenas quantidades, tendem a aumentar a resistência a tração do compósito em seu estado fresco, assim, impede que se formem microfissuras na estrutura do compósito durante o assentamento plástico da mistura, que é quando os agregados, devido sua densidade, tendem a depositar-se mais ao fundo da mistura fazendo que a água livre suba e fique na parte mais acima do material, caso haja muita água na mistura ocorre a exsudação muito rápida do concreto, caso em que a água pode levar os finos do material para a superfície.

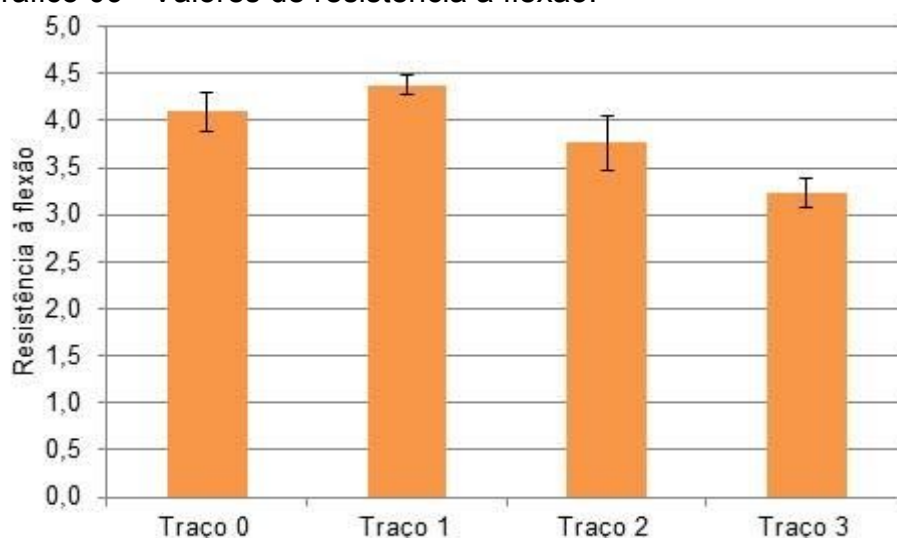
As adições em menores quantidades tendem a permitir que a água seja levada a superfície de uma maneira mais lenta da que ocorre no concreto sem adição de fibras, após isto ela é evaporada, e, portanto não há uma retração por secagem tão expressiva. Este comportamento, nos concretos com teores médios e altos ocorre de maneira ainda mais significativa, portanto, a água não chega na

superfície permanecendo dentro do compósito, tornando-o mais poroso, ainda mais aliado ao comportamento mais viscoso que os traços 2 e 3 obtiveram, constatado no *slump test*.

Ainda, observa-se que o ganho de resistência ocorre de maneira célere, devido ao uso do cimento do tipo CPV ARI, que promove ganho de resistência elevado nas primeiras idades, devido a finura do aglomerante. Este comportamento concede ao concreto aproveitamento mais célere da água na mistura para hidratação do cimento, e portanto, a retração de secagem ocorre de modo mais expressivo, deste modo os efeitos de fissuras por retração de secagem que ocorre no concreto sem adição de fibras e o fenômeno de retenção da água no interior do concreto que ocorre naquele com maiores adições de fibras dão ao concreto um comportamento semelhante de perda de resistência fazendo-os terem valores médios aproximados. Efeitos estes que são minimizados no traço 1, devido às características que as pequenas adições de fibras propiciam ao material, não ocasionando a retenção excessiva da água da mistura.

Além das amostras ensaiadas por compressão axial foram ensaiadas para o mesmo traço, amostras prismáticas, para obtenção das resistências à flexão, os resultados obtidos estão descritos no Gráfico 09.

Gráfico 09 - Valores de resistência à flexão.



Fonte: do autor (2020).

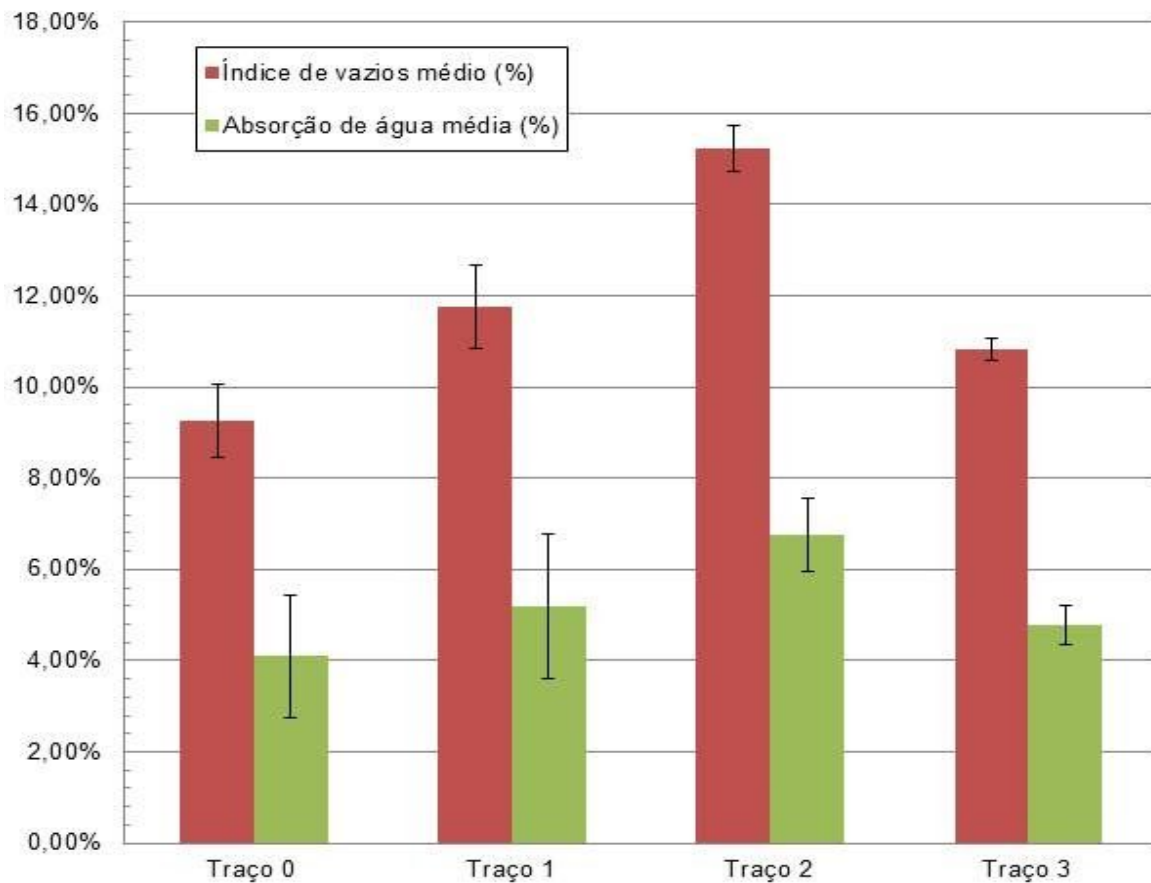
Para as amostras de ensaio a flexão é evidenciado comportamento semelhante ao que ocorre com as amostras submetidas à compressão axial, tendo em vista a mesma explicação. Observa-se agora no traço 3 um valor mais expressivo de perda de resistência, isto ocorre devido a presença de poros no interior do material concentrar as tensões permitindo maior propagação das fissuras. As microfibras de PP são eficientes no comportamento do material em estado fresco, modificando, dentro do possível, as características de endurecimento do material, contudo em estado endurecido, por ter resistência inferior à da matriz cimentícia, concedem ao material uma resistência residual pós fissuramento, além de proporcionar uma maior tenacidade ao material, isto é aumento da deformação antes da fissura, o que para a matriz cimentícia, de comportamento de ruptura frágil, não permite maiores ganhos de resistência.

#### **4.2.2 Absorção por imersão**

Após a cura úmida, houve a realização do ensaio de absorção por imersão com a idade de 28 dias, os resultados obtidos estão expostos no Gráfico 10, o valor de resistência obtido após o ensaio de absorção está no Gráfico 11.

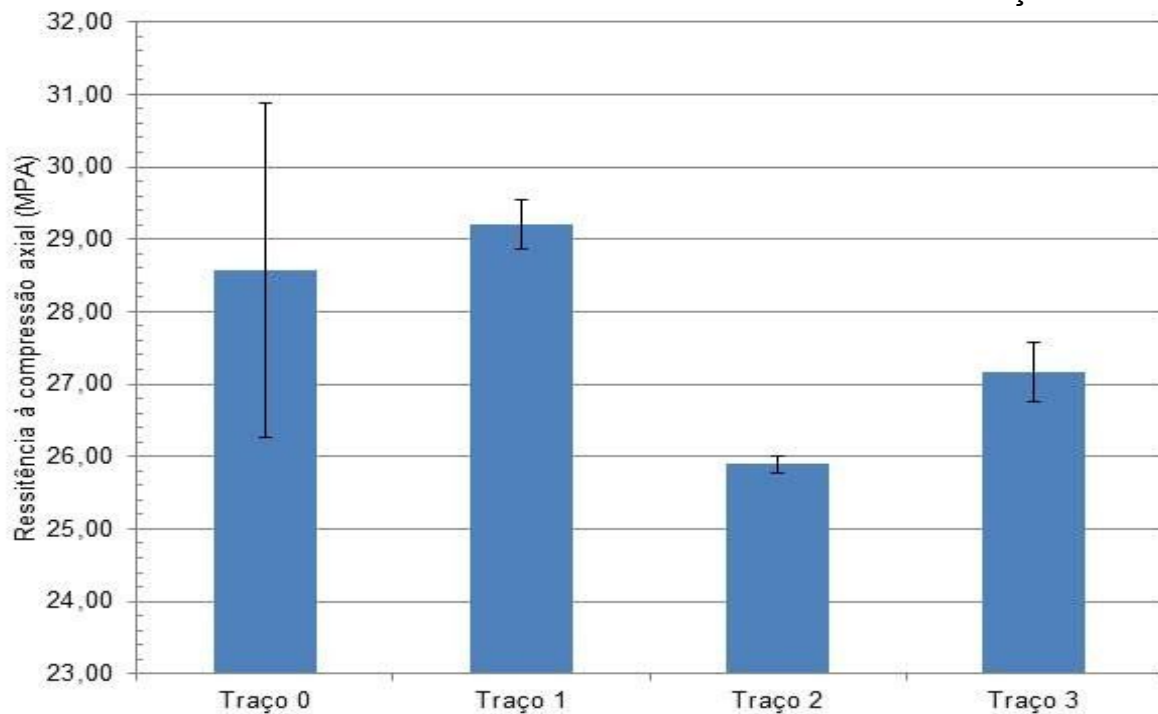


Gráfico 10 - Valores do ensaio de absorção por imersão.



Fonte: do autor (2020).

Gráfico 11 - Resistência das amostras submetidas ao ensaio de absorção.

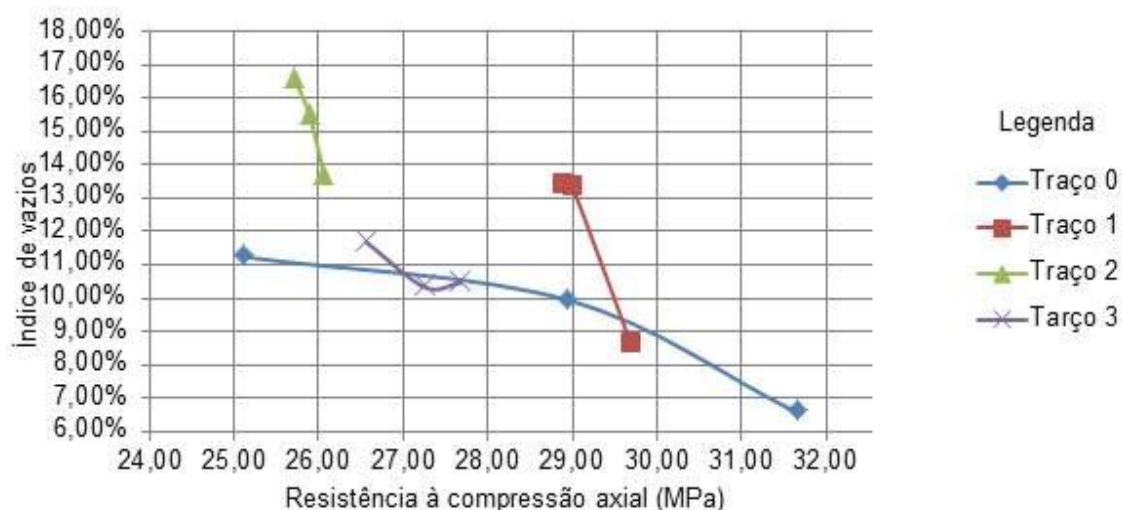


Fonte: do autor (2020).

Observa-se que os valores de resistência média seguem um comportamento similar ao encontrado para os corpos de prova ensaiados aos 28 dias de idade, isto é, o traço 1 teve um ganho de resistência em comparação com o traço 0, e os traços 2 e 3 houve uma perda de resistência se comparados ao mesmo traço. Contudo houve uma redução de parte da resistência de um modo geral, isto pode ter ocorrido devido o ensaio de rompimento ter ocorrido com as amostras saturadas, diferente do que ocorre com as amostras que estavam na cura úmida que possuíam relação de umidade de 95% do ambiente de exposição. Deste modo a água nos poros do concreto ao ser pressionada geraria tensões internas, similares ao que ocorre em solos saturados.

Houve a necessidade de compilar os dados encontrados para esta correlação entre valores de índice de vazios e de resistência encontrados, a fim de efetuar análise das variações encontradas, optou-se pela apresentação destes no Gráfico 12.

Gráfico 12 - Relação resistência e índice de vazios.



Fonte: do autor (2020).

Observa-se que a os traços com adição de fibra é menos sensível a variação de resistência de acordo com o índice de vazios, isto remete a condição das fibras promover uma melhor distribuição das tensões na matriz cimentícia, isto se estiverem transversal ao sentido da tensão aplicada. Neste caso o comportamento de variação do valor de resistência para o traço 0 comportou-se diferente dos encontrados para os CPs ensaiados com idade de 28 dias, que apresentaram um

desvio padrão de 0,9 MPa, diferente do encontrado para o ensaio de absorção por imersão. Devido ao procedimento de secagem dos corpos de prova em estufa a fim de pesagem deste seco, originaram-se microfissuras pela variações térmicas desta secagem em estufa, as quais podem ter sido menos expressivas nos CPs que tem em sua composição as fibras de PP.

Para o traço 3 o comportamento teve uma divergência pouco expressiva, tendendo a comportar-se de modo a ser considerado como um comportamento linear, similar aos ocorridos com os traços 1 e 2.

### **4.3 Carbonatação**

Após o período de pré-condicionamento e de execução do ensaio de carbonatação acelerado, foram evidenciados algumas situações que julgaram-se necessárias de serem elucidadas.

#### **4.3.1 Protótipo**

O protótipo desempenhou papel adequado para o ensaio de carbonatação acelerada, contudo percebeu-se algumas condicionantes que poderiam sofrer melhorias.

Observou-se durante a reação química entre os reagentes que ocorria uma reação endotérmica, havia o resfriamento do frasco, bem como para que não houvesse extravasamento do frasco para dentro da câmara era necessário uma mistura lenta dos reagentes, isso ocorre devido a velocidade de reação que promove o desprendimento do CO<sub>2</sub> gasoso, similar ao que acontece em refrigerantes quando são agitados. Assim percebeu-se que poderia ser adequado a recipientes de maior capacidade volumétrica, indicando-se o uso de garrafas de PET com capacidade de 3 litros, em substituição das de 250 mililitros, ajustando para tal o volume de cálculo utilizado para concentração de CO<sub>2</sub> a ser confeccionado, ou seja, aumento da quantidade de reagentes.

Além disto nos gráficos de exposição percebe-se que há uma efetiva variação da temperatura, mesmo em ambiente protegido, cito cômodo residencial climatizado. Relata-se uma necessidade de revestimento externo da câmara com material de

menor condutibilidade térmica, como poliuretano ou poliestireno expandido a fim de minimizar essa amplitude térmica.

Para a prateleira inferior da câmara faz-se necessário uso de uma grade vazada para permitir que o  $\text{CO}_2$  acesse a face inferior da amostra. Isto foi vislumbrado na etapa de pré condicionamento, e portanto, os CPs que teriam as profundidades de carbonatação mensuradas foram postos na prateleira superior, distribuídos de maneira aleatória.

A vedação de látex da porta frontal da câmara teve que ser retirada após o ciclo de carbonatação, devido ao seu desgaste. Deste modo, a fim de prolongar durabilidade do protótipo, sem que sejam necessárias manutenções a cada abertura da câmara sugere-se a adaptação de borrachas destas similares às utilizadas para refrigeradores afixadas na parte frontal do protótipo.

O uso de silicone de cura acética foi necessária devido ao prazo de entrega do referido trabalho, pois sua cura era realizada relativamente rápida, sendo em períodos de 24 a 72 horas, dependendo da quantidade aplicada. Contudo, a cura deste tipo de material origina ácido acético, o qual se estiver em contato direto com a estrutura metálica não protegida, tende a originar pequenos pontos de corrosão. Cabe ressaltar que a estrutura do protótipo estava pintada, e portanto houve a constatação de pontos de corrosão em poucas partes da estrutura. Assim, para não comprometer a vida útil do protótipo indica-se o uso de silicone neutro, o qual demora mais tempo para curar completamente podendo chegar até 2 semanas, segundo alguns fabricantes.

Indica-se ainda a adição de alguns fechos de pressão adicionais na porta a fim de reduzir a pressão em apenas um, e aumentar assim a durabilidade e a segurança do protótipo.

Após a reação era esperado que a umidade no interior do protótipo aumentasse devido a produção de água que ocorria como um dos produtos da reação, juntamente com o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{NaCl}$ . Contudo esta não ocorreu, o que houve foi um decréscimo bem lento desta, mesmo com as válvulas do mecanismo de

desumidificação fechadas. Isso ocorreu devido a quantidade de sal de cozinha, NaCl, produzida ser alta, evidenciada na garrafa que houve a reação na Figura 30, sendo constatada como parcela sedimentada no fundo. Acredita-se que esta quantidade elevada de cloreto de sódio tendeu a reduzir a umidade no interior do protótipo por osmose, isto talvez explique a origem da redução da umidade após a câmara estar selada e com o mecanismo de desumidificação fechado. Cabe ressaltar ainda que o equipamento de leitura, termohigrômetro, também possui variações de suas leituras, sendo tratado como  $\pm 3\%$  de precisão.

Figura 30 - NaCl em sedimentação.

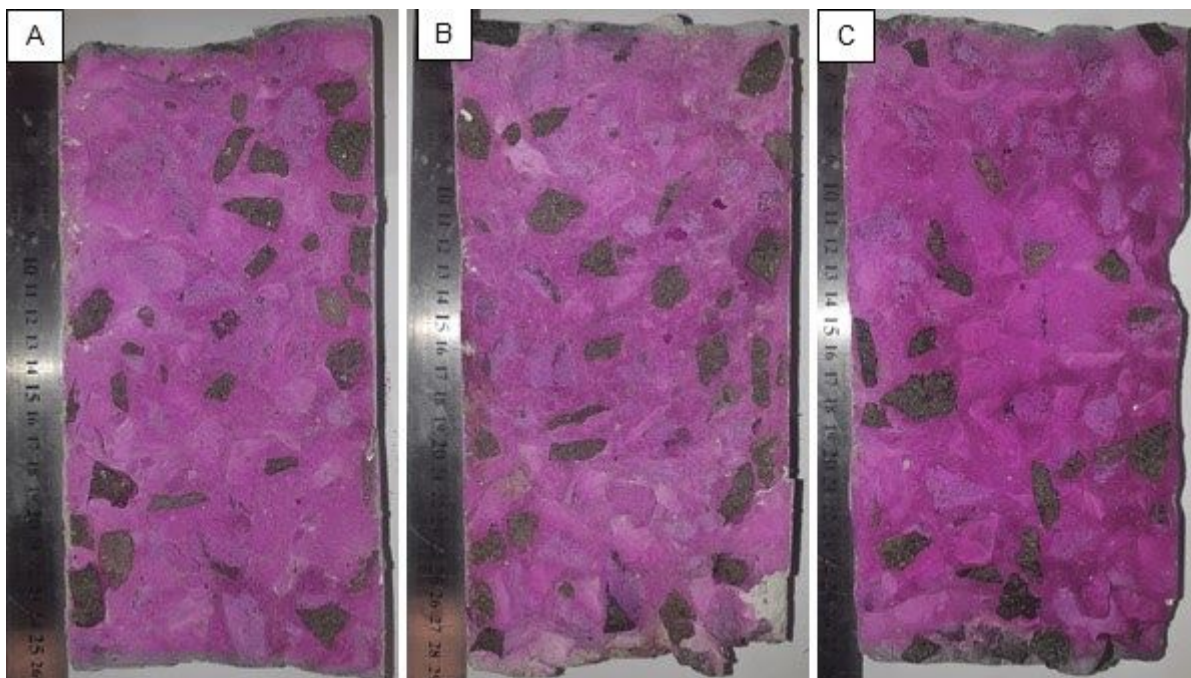


Fonte: do autor (2020).

#### **4.3.2 Penetração da carbonatação**

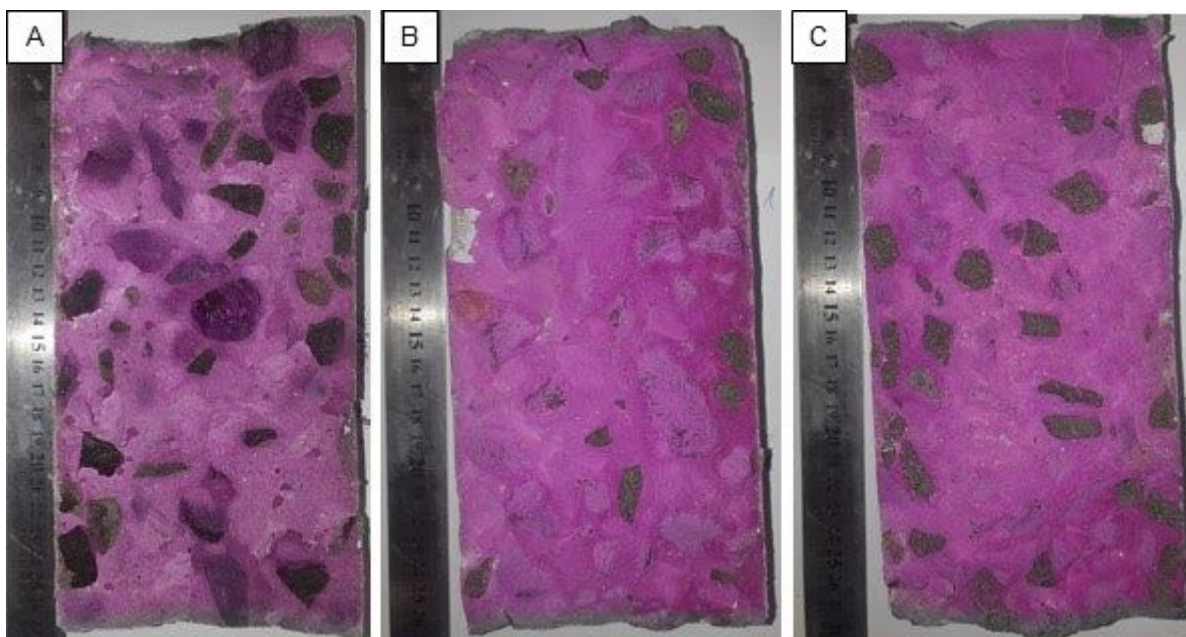
Após a realização do procedimento descrito de carbonatação acelerado, os CPs foram rompidos à compressão diametral, com a finalidade apenas da visualização da secção. Após o tingimento da secção pelo reagente indicativo de pH, o resultado encontrado está visível nas Figuras 31, 32, 33 e 34, para os traços 0, 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 31 - Indicação pH traço 0 amostra a (A). Indicação pH traço 0 amostra b (B). Indicação pH traço 0 amostra c (C).



Fonte: do autor (2020).

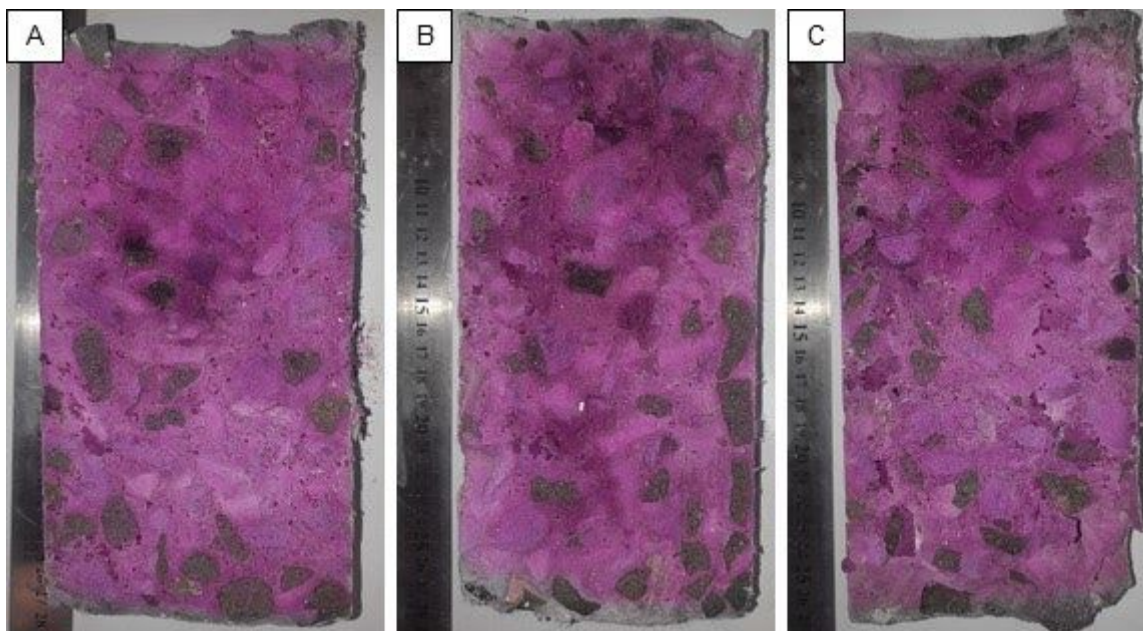
Figura 32 - Indicação pH traço 1 amostra a (A). Indicação pH traço 1 amostra b (B). Indicação pH traço 1 amostra c (C).



Fonte: do autor (2020).

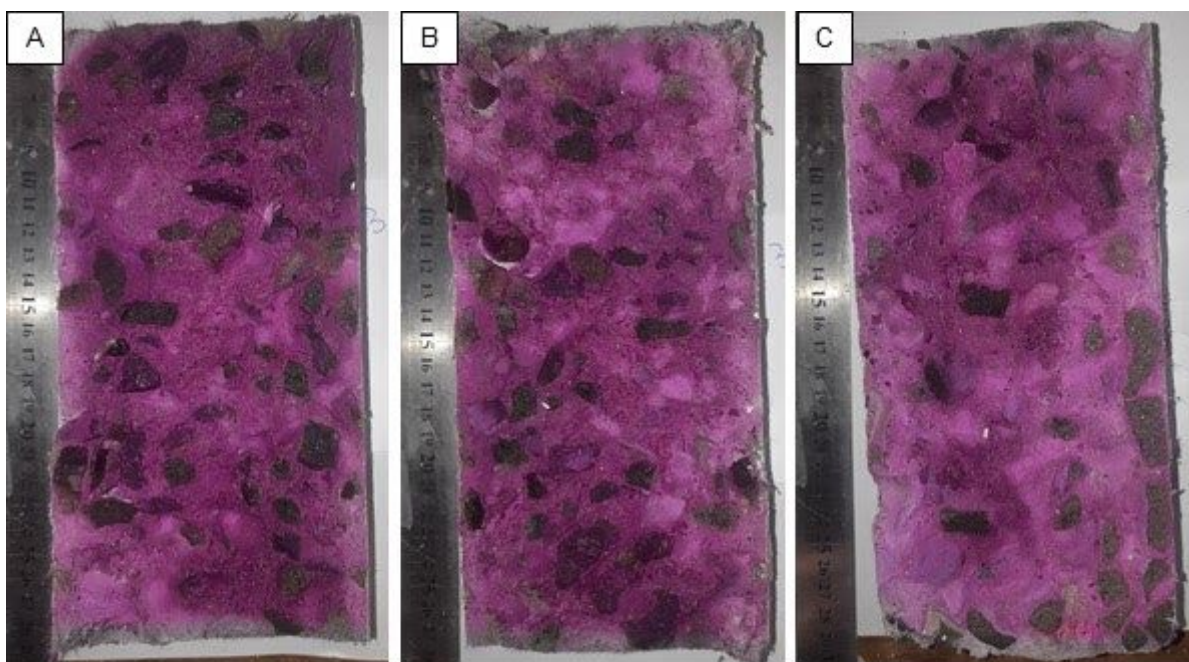


Figura 33 - Indicação pH traço 2 amostra a (A). Indicação pH traço 2 amostra b (B). Indicação pH traço 2 amostra c (C).



Fonte: do autor (2020).

Figura 34 - Indicação pH traço 3 amostra a (A). Indicação pH traço 3 amostra b (B). Indicação pH traço 3 amostra c (C).



Fonte: do autor (2020).

Evidencia-se nos traço 2 e 3 que as fibras demoram mais a perder a coloração carmim, pois utiliza-se mais reagente até atingir a superfície do compósito para o tingimento do mesmo, tendo em vista a formação de gotículas nas fibras

expostas. Estas fibras apresentaram a coloração em tons de rosa, indicando que tiveram boa aderência ao material cimentício, e que após o rompimento estes ainda estavam aderidos. Além disto os traços 0 e 1 tiveram um comportamento do rompimento da secção para realização da medição mais quebradiço, ocorrendo deslocamentos da área a ser analisada, o que é evidenciado nos CPs de identificação 0b, 0c, 1b e 1c, constantes nas Figura 31 e 32, portanto os tons de cinza no meio do CP remetem-se a deslocamentos ocorridos após a aspersão do reagente indicativo de pH.

Com a utilização de software do tipo CAD foram traçadas as áreas que sofreram carbonatação e foi elaborado a Tabela 08, onde está relacionado os valores de área e profundidade média de carbonatação, para que fosse realizada a medição de carbonatação conforme o descrito no capítulo anterior.

Tabela 08 - Valores de penetração a carbonatação.

	Identificação do traço	0	1	2	3
	Identificação do CP				
área base de cálculo (mm²)	a	573,15	586,41	429,35	581,49
	b	499,74	509,63	726,18	865,24
	c	490,52	563,32	855,01	812,88
profundidade média (mm)	a	3,39	3,42	3,18	3,52
	b	6,11	2,69	5,66	5,04
	c	3,03	3,31	5,24	4,83

Fonte: do autor (2020).

Observa-se que o traço 1 possui o menor valor de carbonatação se comparado aos outros traços, contudo os traços 0, 2 e 3 também têm valores baixos, aproximados de 3 mm. Esta variação de valores de carbonatação faz necessário a relação dos traços com seus índices de vazios, que também apresentavam algumas variações elevadas.

O valor obtido para a amostra do traço 0 de identificação b remete a ver que a área da parte inferior, visível na Figura 31, teve um rompimento por compressão diametral que danificou a parte a ser analisada, e assim, a área significativamente menor a ser avaliada, portanto ao comparar a área base de cálculo com as demais



achar-se-á valores elevados, de 6,11 mm, para áreas similares. Indica-se a retirada deste valor das avaliações, efetuado para esta apenas a medição do valor da parte superior, devido a perturbação provocada pelo rompimento. Os valores médios considerados conforme as duas superfícies avaliadas, desconsiderado o valor encontrado para a superfície inferior do CP de identificação b do traço 0, está apresentado na Tabela 09.

Tabela 09 - Resultados médios de profundidade de carbonatação.

Traço	0	1	2	3
Profundidade média de carbonatação (mm)	3,38	3,14	4,69	4,47
Volume aproximado de concreto carbonatado (cm <sup>3</sup> )	251,35	234,51	341,56	326,20

Fonte: do autor (2020).

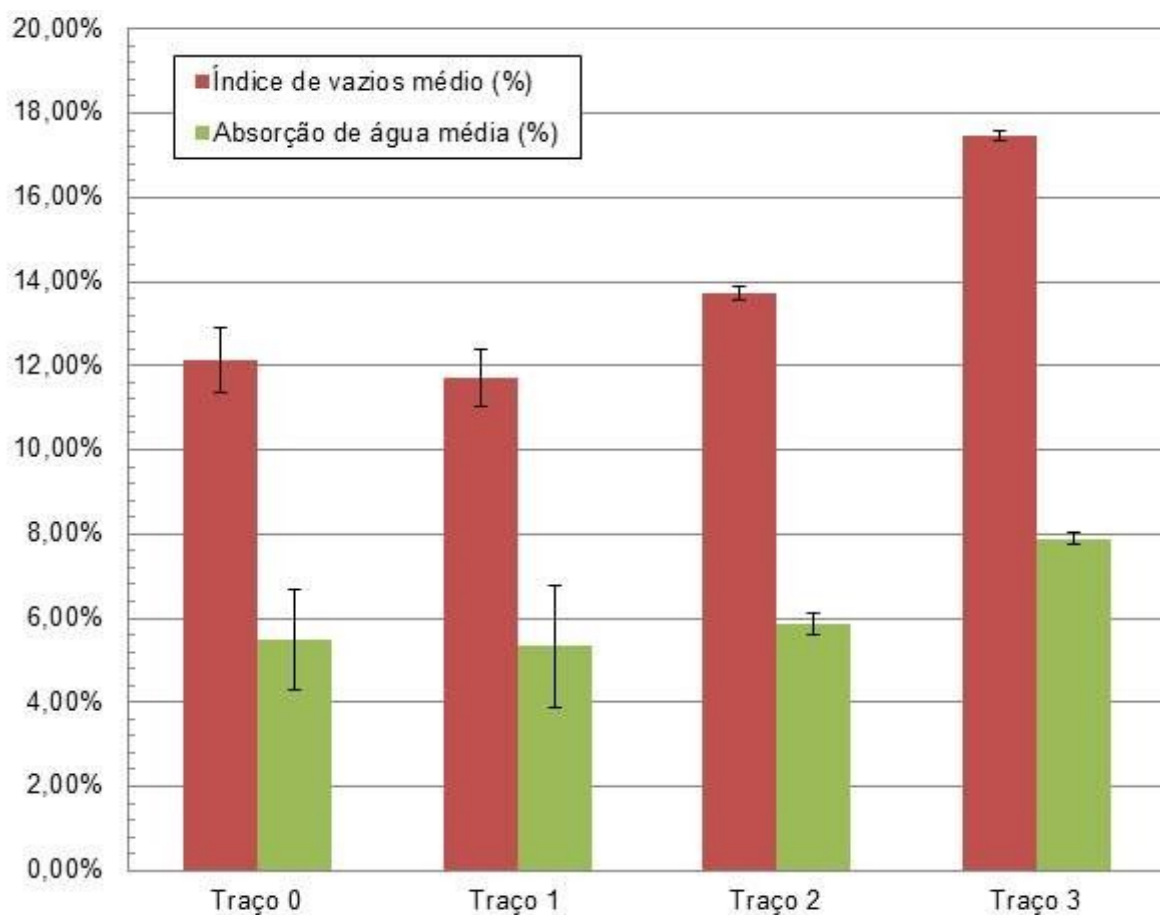
A estimativa a partir do valor da média, é uma relação genérica, de comportamento geral, contudo se for considerado que a matriz cimentícia é a mesma utilizada em todos os traços e que os traços 2 e 3 são os que tiveram a menor trabalhabilidade, e portanto, o adensamento carenciava de maior energia, e isto originou nestes maiores valores de vazios próximo a superfície, bem como do comportamento citado de assentamento plástico, que tende a reter a água na mistura gerando uma maior porosidade, e isto favorece a penetração do CO<sub>2</sub>. O comportamento da profundidade de carbonatação depende muito da porosidade da superfície exposta, bem como da distribuição dos poros comunicáveis, e esta porosidade relaciona-se com a matriz cimentícia e seu adensamento. São muitos fatores que direcionam o comportamento dos vazios no compósito, contudo para Paulon *apud* Pelisser (2002) as adições em 900g/m<sup>3</sup> reduzem em 20% a absorção por capilaridade do material, esta redução se demonstra na profundidade de carbonatação, ainda que menos sensível, devido a outras variáveis, como por exemplo a relação de a/c e a retração autógena que o CP V ARI promove devido a finura do cimento, que gera maior área hidratação das partículas do mesmo, acelerando assim sua reação.

### 4.3.3 Ensaios de controle mecânico

#### 4.3.3.1 Absorção por imersão

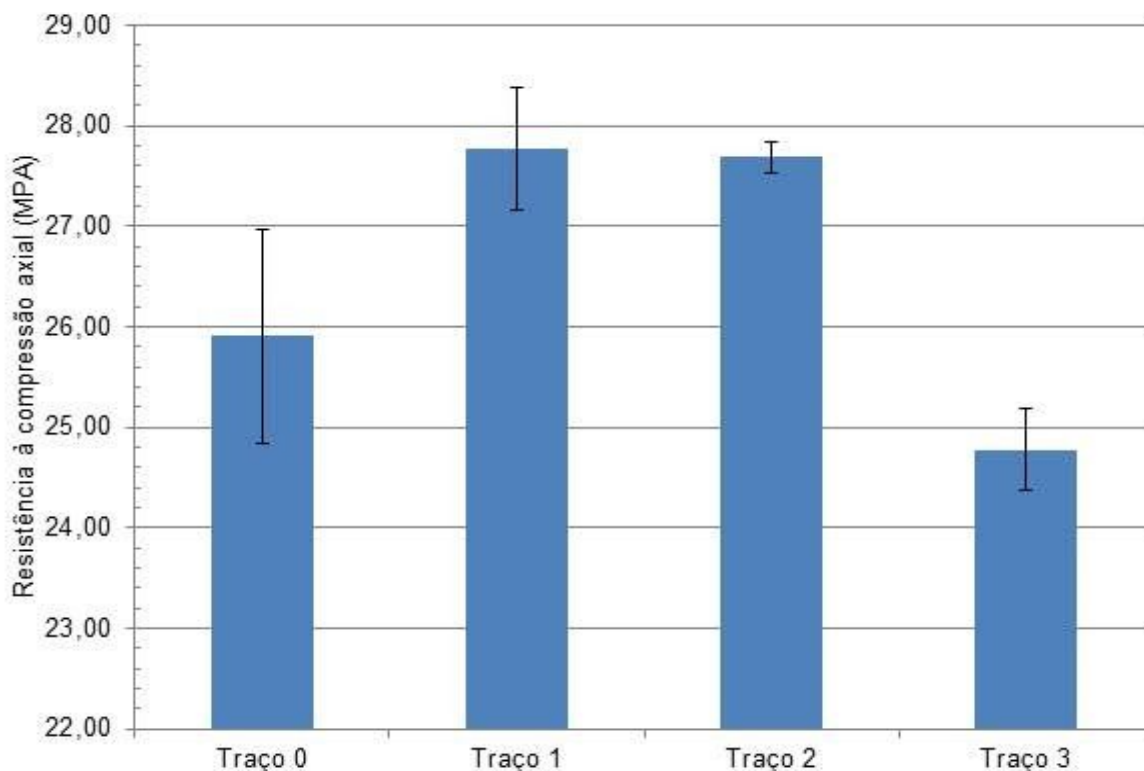
Após a carbonatação acelerada, houve a realização do ensaio de absorção por imersão com a idade de 70 dias, os resultados obtidos estão expostos no Gráfico 13, os valores de resistência encontrados para as amostras estão no Gráfico 14.

Gráfico 13 - Valores do ensaio de absorção por imersão das amostras carbonatadas.



Fonte: do autor (2020).

Gráfico 14 - Resistência das amostras carbonatadas submetidas ao ensaio de absorção.

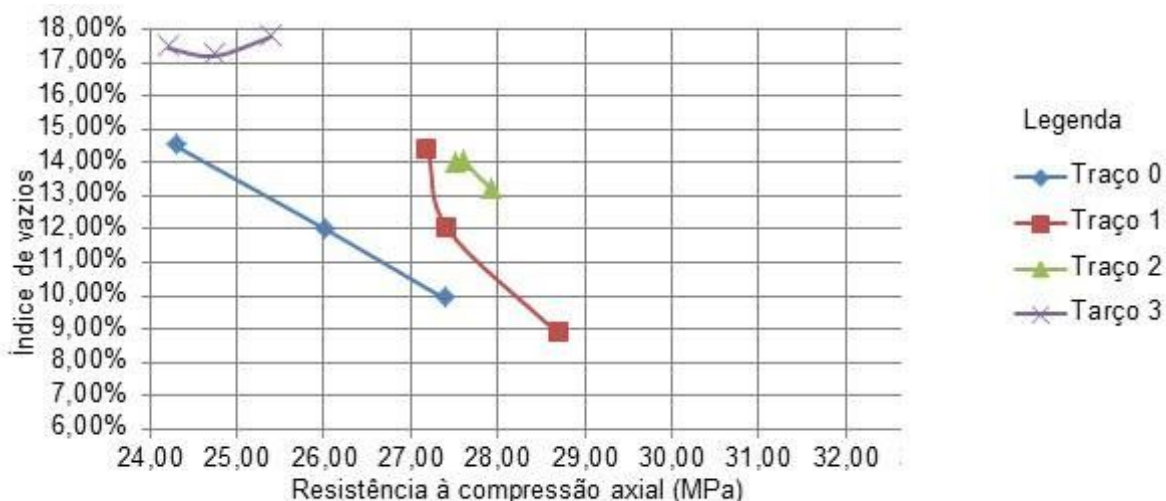


Fonte: do autor (2020).

Observa-se que os comportamento dos valores médios, neste caso, estão diferentes dos encontrados para o ensaio de absorção por imersão das amostras de 28 dias de idade, e que não sofreram carbonatação. Cabe ressaltar que durante a carbonatação há a retração do material, ocasionado pela reação entre os compostos da pasta de cimento hidratada, em especial a portlandita, e que tal comportamento tende a gerar na superfície carbonatada microfissuras.

Os valores de desvio padrão para o traço 0 estão ainda maiores que encontrados pelo ensaio dos CPs não expostos à carbonatação, o que sugere o mesmo comportamento avaliado para as amostras não carbonatadas, onde a secagem tende a originar microfissuras devido a variação térmica do material. Para melhor visualização dos resultados foram compilados os dados no Gráfico 15.

Gráfico 15 - Relação resistência e índices de vazios das amostras carbonatadas.



Fonte: do autor (2020).

Observa-se o comportamento similar às amostras anteriormente ensaiadas, onde os traços com adições de fibras têm uma menor sensibilidade na relação resistência e índices de vazios. Houve uma maior evidência na queda das resistências se comparados aos mesmos índices de vazios, para cada traço, das amostras ensaiadas anteriormente, o que remete a variação volumétrica que ocorre devido a carbonatação, aliada a perda de resistência dos compósitos cimentícios, como a portlandita, presentes de modo significativo na matriz cimentícia que ao reagir com o dióxido de carbono, perde parte de sua resistência.

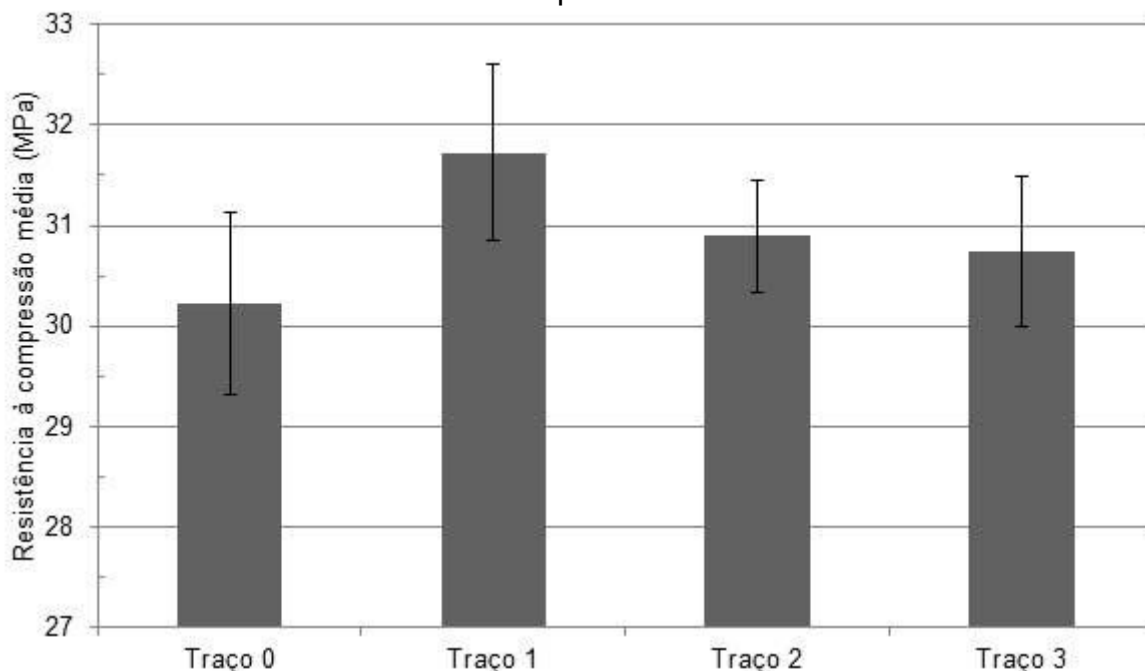
Constata-se ainda que o traço 2 teve uma distribuição dos valores de resistências serem muito próximas como os índices de vazios destes. Deste modo, acredita-se que terá um comportamento similar ao encontrado aos das demais amostra nas expostas ao dióxido de carbono, tendo menores perdas de resistência para maiores índices de vazios se comparado com um concreto sem adição de fibras.

#### 4.3.3.2 Resistência

Além dos ensaios descritos de absorção por imersão foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, com as amostras de idade de 70 dias,

sendo que estas foram submetidas ao ensaio de carbonatação acelerada. Os resultados encontrados para o respectivo ensaio estão elencados no Gráfico 16.

Gráfico 16 - Valores de resistência a compressão das amostras carbonatadas.



Fonte: do autor (2020).

Além do já visto nos ensaios de carbonatação acelerada, observa-se a redução das resistências quando em comparação com os resultados encontrados para os corpos-de-prova que não sofreram carbonatação. Além disto evidencia-se que os resultados de resistência a compressão médios são maiores que os encontrados para as amostras submetidas ao ensaio de absorção por imersão, deste modo, é passível de observar que a secagem dos corpos de prova para o referido ensaio tende reduzir a resistência média dos mesmo, por entender que esta secagem pode originar microfissuras na estrutura do concreto, mais facilmente evidenciado tal interferência no traço sem adição de fibras de PP.

Na parte que teve sua carbonatação efetivada o  $\text{CO}_2$  tende a reagir com o hidróxido de cálcio, e, conforme citado por Recena (2017), o hidróxido de cálcio, na forma de portlandita pode constituir de 20 a 25% da pasta de cimento hidratada e, portanto, reflete em parte da resistência do material. Ao considerar que o material em contato com a prensa tem resistência menor devido a carbonatação das faces expostas, podem se originar fissuras nestes que concentrem tensões de maneira

irregular no centro do CP, e assim mesmo que boa parte da amostra tenha resistência inalterada a trinca originada nesta face pode propagar-se e, de certo modo, reduzir de maneira expressiva a resistência da amostra, esta seria a possível explicação do motivo da redução expressiva dos valores médios de resistência à compressão, se considerar que a carbonatação do corpo de prova aconteceu apenas na superfície exposta do mesmo.

Compilando os dados entre a perda de resistência e os valores de profundidade de carbonatação encontrados, foi possível estimar uma relação entre as médias encontradas de volume carbonatado de concreto, e de perda de resistência média encontrada para os corpos de prova carbonatados, esta relação está expressa na Tabela 10.

Tabela 10 - Relação carbonatação e resistência.

Traço	Média de perda da resistência, comparação entre amostras não carbonatadas e carbonatadas (MPa)	Volume médio de concreto carbonatado (cm³)
0	3,12	251,35
1	3,86	234,52
2	2,48	341,57
3	1,93	326,20

Fonte: do autor (2020).

Nesta relação pode-se perceber que para os maiores valores de profundidade de carbonatação encontrados, têm-se as menores perdas de resistência, cito traço 2 e 3. Isto ocorre devido a capacidade das fibras em impedir o comportamento citado da microfissuração gerada pela retração ocasionada pela carbonatação, aliado ao comportamento. Deve-se ainda perceber que a variação entre o menor e o maior valor de volume carbonatado estimado é correspondente a apenas 5,7% do volume total da amostra cilíndrica, assim a perda de resistência deveria ser menos expressiva. Ao considerar que as faces do concreto em contato com a prensa sofrem com a microfissuração pela retração da carbonatação, aliado a perda de resistência devido a reação com a portlandita, que ocorre nesta, obtém-se que a resistência do interior do material decresce devido a concentração de tensões originadas pelos fatores citados.

## **5 CONCLUSÃO**

Com o presente trabalho foi possível evidenciar alguns comportamentos que as adições de fibras de polipropileno possibilitam ao compósito. As alterações em sua formulação irá definir as propriedades que podem ser obtidas com o compósito em seu estado endurecido, e, deste modo, percebe-se que as adições em pequenas quantidades geralmente tendem a beneficiar o material gerando novas propriedades, ou otimizando outras, sem que haja perda de outras características, como principalmente trabalhabilidade, e o assentamento plástico e retração plástica. A aplicabilidade de adições de fibras em grande concentração deve prever que o material sofrerá com a perda significativa de trabalhabilidade, sendo necessária outra medida que vise compensar tal condição, como principalmente o uso de superplastificantes.

Em algumas situações pode ocorrer que nem mesmo a utilização de aditivos consiga adequar o material em seu estado fresco aos parâmetros mínimos para ser empregado em estruturas, assim pode-se estabelecer que este uso é restrito a condições experimentais ou excepcionais, devido às restrições que podem ser originadas destas adições em grandes quantidades, além de causar ao concreto comportamento bem distinto na ação de endurecimento, promovendo maior retenção de água, menores retrações por exsudação do material, e menores retrações plásticas em comparação com traços sem as adições, por causa do comportamento da fibra de polipropileno, que fornece ao material uma maior resistência da pasta durante o seu endurecimento.

Em seu estado endurecido, obtém-se resistências mais elevadas nos traços de baixas adições e naqueles sem adições, devido ao comportamento de

assentamento plástico mais dinâmico, que permite que a água possa ser evaporada com maior facilidade em baixas concentrações de fibras se comparadas as altas, aliando nestas as características de menores retração por secagem se comparadas ao traço sem fibras. Assim como no estado fresco, o uso de maiores quantidades de fibras tende a perder resistência a compressão de maneira significativa do material em estado endurecido.

As adições em médias e grandes quantidades tendem a tornar o material menos sensíveis a variações de resistência à compressão para uma variação de vazios do material, ou seja, as fibras tendem a reduzir a variação de resistência para diferentes amostras, mesmo que possuam diferentes índices de vazios. Esta atribuição dá-se ao comportamento das microfibras, que se bem aderidas ao material, retardaram a origem das microfissuras originadas por variações volumétricas na secagem, na carbonatação e na variação térmicas.

A relação resistência e porosidade pode ter sido influenciada pela execução do ensaio de absorção por imersão, que estabelece que deve haver a secagem completa do material para pesagem, e isto pode ocasionar microfissuras no interior do mesmo devido a variação térmica, assim, para que seja confirmado tal comportamento, seria necessário um trabalho com aprofundamento nesta hipótese, para fins de ser passível de desconsiderar tal variável.

Foi evidenciada a possibilidade de confecção de um protótipo de uma câmara de carbonatação acelerada, confeccionado com equipamentos simples e que o comércio local de grande parte das cidades têm a disposição. O valor da referida confecção pode variar de acordo com a disponibilidade de produtos na região, sendo que o protótipo teve entre suas despesas um valor aproximado de 800,00 reais, sendo o elemento de maior valor a estrutura metálica e os fechamentos com vidro, que somados correspondem a aproximadamente 70% do valor final do produto. O referido protótipo foi construído em cerca de seis semanas, sendo que buscou atender a pré definições de outros trabalhos na área de tecnologia do concreto, haja vista que não há regularização técnica que estabeleça os critérios base, e mínimos para tal ensaio.



Após o término do referido trabalho buscar-se-á aperfeiçoamento do protótipo com base nas proposições observadas, e a sua aplicação em outros trabalhos acadêmicos.

Quanto a questão do comportamento da carbonatação foi evidenciado um comportamento singular, em que teve-se reduções das resistências médias para as amostras que sofreram a carbonatação. Ao realizar uma relação entre as médias das quantidades carbonatadas para cada traço observou-se que os concretos que tinham médias e altas adições de fibras de PP obtinham menores variações destas resistências, mesmo que em tese tiveram uma maior quantidade de carbonatação. Isto decorre devido a ação das fibras coibir parte da origem de microfissuras provenientes da retração por carbonatação.

A medição de carbonatação média para cada corpo-de-prova teve variações sensíveis para os traços ensaiados, sendo nas médias obtidas uma variação entre 3,14 e 4,69 mm. Não é possível afirmar que os traços que encontraram as menores médias são realmente mais resistentes a carbonatação, pois o comportamento está atrelado a porosidade do material. Deste modo, ao consultar as variações de porosidade encontradas para o traço sem adição e para o traço com baixas adições percebe-se que ambos tiveram grandes variações da porosidade e mesmo assim obtiveram resultados promissores de resistência a penetração da carbonatação.

Para que resultados sejam mais expressivos seria necessário um ensaio que englobasse mais tempo de exposição a fim que amplificar esta variação de profundidades de carbonatação, promovendo ao material valores mais distintos para cada traço, bem como optar em utilizar amostras de dimensões menores para que sejam submetidas à carbonatação acelerada mais amostras, e possa ser efetuado a retirada dos valores os desvios excessivos a média, originados pelas variações de índices de vazios. Corpos de provas menores propiciaram maiores controles sobre o adensamento do material, considerando de modo mais específico os fenômenos de endurecimento da pasta cimentícia, das fases de assentamento plástico e de retração plástica e autógena.

De modo geral, os resultados para as amostras com baixas adições de microfibras, de 0,1%, são promissoras, apresentando-se sempre com resultados sensivelmente melhores em comparação aos demais, bem como o seu comportamento frente a carbonatação também obteve resultados mais adequados a promover indicativos de durabilidade. Aos concretos com altos teores vê-se muitas variações, bem como limitações ao seu uso, sendo necessárias de serem executadas para avaliação da variação do comportamento do material, mas seriam pouco indicadas para uso prático, necessitando condicionantes específicas e de estudos para efetuar seu emprego.

Para que seja possível melhor entender as características que a variação de fibras pode causar no material, levanta-se a possibilidade de avaliar o comportamento que as adições em quantidades intermediárias a 0,1% e 0,5% podem promover.

O traço de controle, sem adição, foi utilizado como parâmetro para controle das características obtidas pela adição de fibras, e seu comportamento é muito similar ao daquele encontrado para o traço de baixo teor de fibras, tendo em vista a terem a mesma composição da matriz cimentícia, isto indica que a adição direta de fibras, nas quantidades reduzidas, é efetivamente viável para emprego comercial, não carenciado de correções de traço com aditivos, e apresenta uma singela melhoria no comportamento de resistência à carbonatação, à compressão e à flexão, principalmente.

## REFERÊNCIAS

ADORNA, D. L. **Carbonatação acelerada em concretos com adição de cinzas de lodo de estação de tratamento de água**. 2016. 139f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: PINI, 1992. 108p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO *PORTLAND*, **ABCP BT 106: Guia básico de utilização do cimento *Portland***. São Paulo, 2002. 27p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de janeiro, 2010. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de janeiro, 2017. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 5738: Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de janeiro, 2015. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de janeiro, 2007. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de janeiro, 2014. 238p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 7217: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 1987. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 7584: Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 7680-1: Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão axial**. Rio de Janeiro, 2015. 27p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2019. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 9775: Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, RJ, 2011a. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 9939: Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, RJ, 2011b. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem**. Rio de Janeiro, RJ, 2003c. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, RJ, 2009. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR NM ISO 3310-1: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação. Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (ISO 3310-1, IDT)**. Rio de Janeiro, 2010. 20p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15575: Desempenho de edificações habitacionais**. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, RJ, 2013. 60p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, RJ, 2015. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, RJ, 2005. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, RJ, 2003d. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, RJ, 1998d. 8p.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibras de carbono**. 2003. 317f. Dissertação (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BRASIL, **‘Construção civil é setor importante para o País’, diz ministro** - Principal parceria do setor com o ministério é na execução do programa Minha Casa, Minha Vida. *online*, 2013. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/editoria/infraestrutura/2013/10/2018construcao-civil-e-setor-importante-para-o-pais2019-diz-ministro/>>. Acesso em: 20 out. 2019.

BRASIL, Lei nº 10406, de 10 de janeiro de 2002. Institui o código civil. **Diário oficial [da] União**, Brasília, DF, 10 jan. 2002. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2002/110406.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/110406.htm)>. Acesso em: 10 set. 2019.

BRASIL, Lei nº 8078, de 11 de setembro de 1990. Dispõe sobre a proteção do consumidor e dá outras providências. **Diário oficial [da] União**, Brasília, DF, 11 set.

1990. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l8078.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8078.htm)>. Acesso em: 10 set. 2019.

BUENO, J. C. A responsabilidade do construtor pela solidez e segurança: aspectos gerais e sugestões ao Projeto da Lei nº 936/2003. IN: PORTO NETO. B. **Manual jurídico para construção civil**. São Paulo: PINI, 2007. p.9-28.

CADORE, W. W. **Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada**. 2008. 150f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2008.

CASTRO, E. **Estudo da resistência à compressão do concreto por meio de testemunhos de pequeno diâmetro e esclerometria**. 2009. 126f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2009.

CHEMIN, B. F. **Manual da Univates para trabalhos acadêmicos: planejamento, elaboração e apresentação**. 3ª ed. Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES. Lajeado, 2015. 317p. disponível em: <[https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/110/pdf\\_110.pdf](https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/110/pdf_110.pdf)>. Acesso em 11/10/2019.

COELHO, V. A. **Desenvolvimento de uma câmara de carbonatação acelerada com obtenção de CO<sub>2</sub> através de reação de dupla troca e controle de umidade**. 2016. 71f. Dissertação (Bacharel) – Centro de Ciências exatas e Tecnológicas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Cruz das Almas, 2016.

CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA, Resolução nº 1090, de 3 de maio de 2017. Dispõe sobre o cancelamento de registro profissional por má conduta pública, escândalo ou crime infamante. **Diário oficial [da] União**, Brasília, DF, 05 mai. 2017. Disponível em: <[http://www.lex.com.br/legis\\_27408590\\_RESOLUCAO\\_N\\_1090\\_DE\\_3\\_DE\\_MAIO\\_DE\\_2017.aspx](http://www.lex.com.br/legis_27408590_RESOLUCAO_N_1090_DE_3_DE_MAIO_DE_2017.aspx)>. Acesso em: 10 set. 2019.

DAL MOLIN, D. C.; TUTIKIAN, B. F. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: PINI, 2008. 140p.

EHRENBRING, H. Z. **Comportamento de concretos reforçados com microfibras de polipropileno (PP), álcool polivinílico (PVA) e recicladas de poliéster (POL) em relação à retração por secagem restringida e às propriedades mecânicas**.

2017. 167f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, 2017.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. 2002. 239f. Dissertação (Doutorado) – Programa de pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

FIGUEIREDO, E. P.; O'REILLY, V. *et al.* Orientação para o diagnóstico. IN:HELENE, P. **Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Red rehabilitar, 2003. p.107-152.

HUSNI, R. *et al.* Ações sobre as estruturas de concreto. IN:HELENE, P. **Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Red rehabilitar, 2003. p. 37-106.

ISAIA, G. C. **Carbonatação do concreto: uma revisão**. Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Santa Maria: Polígrafo, 1999. 41p.

KWAN, A. KH.; WONG, H. HC. ***Durability of Reinforced Concrete Structures, Theory vs Practice***. Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, 2005. 20p.

LORENZI, A.; REGINATO L. A.; LORENZI L. S.; SILVA FILHO L. C. P. *et al.* **Emprego de ensaios não destrutivos para inspeção de estruturas de concreto**. Revista de Engenharia Civil IMED, Online, v.3, n.1, p.3-13, 2016.

LOURENÇO, M. Z.; SOUA, C. A. C. de. Métodos de proteção e aumento da durabilidade do concreto armado. IN: RIBEIRO, D. V. *et al.* **Corrosão em estruturas de concreto armado**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. p.119-170.

LUCENA, C. M. **Avaliação da eficiência de uma câmara de carbonatação acelerada projetada e montada em laboratório**. 2016. 155f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MAIA, A. C.; SOUZA, U. E. L. **Método para conceber o arranjo físico dos elementos do canteiro de obras de edifícios : fase criativa**. 1. Ed. São Paulo: EPUSP, 2003. 26p.

MEDEIROS, G., **Métodos de ensaios não destrutivos para estruturas de concreto**. Disponível em:

<<https://www.cimentoitambe.com.br/metodos-de-ensaios-nao-destrutivos-para-estruturas-de-concreto/>>. Acesso em: 18 set. 2019.

MEHTA, K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Microestruturas, Propriedades e Materiais**. 1. Ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 669p.

MICHAELIS, **Dicionário on-line**. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/>>. Acesso em: 15 set. 2019.

NEVILLE, A. M. **Proprieties of concrete**. London: Pitman Pub, 1981. 779p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS J. J. **Tecnologia do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448p.

OLIVEIRA, H. M. Propriedades do concreto endurecido. IN: BAUER L. A. F. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: LTC, 2016. p. 284-313.

OLIVEIRA, L. C. A.; FABRIS, J. D.; PEREIRA, M. C. *et al.* Óxidos de ferro e suas aplicações em processos catalíticos: uma revisão. **Quim. nova: online**, v. XXXVI, n.1, p. 123-130, 2013.

PAPADAKIS, V.G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. *et al.* **Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation**. **ACI Materials Journal**, Great Britain, v. XLVI, n.88, p. 363-373, 1991.

PARROT, L. J. **A review of carbonation in reinforced concrete**. Slough: British Cement Association. 1987. 126p.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. 2004. 178f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C. **Estimativa de carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 2009. 285f. Dissertação (Doutorado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PAULETTI, C; POSSAN, E; DAL MOLIN, D. C. C. *et al.* Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. VII, n.4, p.7-20, 2007.

PELISSER, F. **Avaliação do desempenho de concreto reforçado com fibras de polietileno tereftalato (pet)**. 2002. 127f. Dissertação (Mestrado) – Programa de



pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

POWERS, T. C.; COPELAND, L. E.; HAYES, J.C.; MANN, H. M. *Permeability of Portland cement paste*. IN: Portland Cement Association. **Bulletin 53**. Chicago: PCA, 1955. p.287-298.

RECENA, F. A. P. **Dosagem e controle de qualidade de concretos convencionais de Cimento Portland**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2017. 260p.

RILEM, *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*. CPC-18 *Measurement of hardened concrete carbonation depth*. **Materials and Structures**, online, v. XXI, n.4, p.453-455, 1998.

RODRIGUES, P. P. F.; BOTACINI, S. M.; GASPARETTO, W. E. **Manual Gerdau de pisos industriais**. São Paulo: Pini, 2006. 109p.

SALDANHA, F. J. M. **Desenvolvimento de um dispositivo de ensaio de carbonatação acelerada com controle de humidade relativa**. 2013. 91f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2013.

SILVA, L. F. M.; ALVES, F. J. L.; MARQUES, A.T. **Materiais de construção**. Porto: Publindústria, 2013. 442p.

SOUZA FILHO, L. M. **Concreto autoadensável e de alto desempenho produzido com fibras de polipropileno e materiais disponíveis na região metropolitana de Manaus**. 2012. 275f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2012.

SOUZA, R. B. **Estudo da retração em fibrocimento reforçado com fibra polimérica**. 2014. 268f. Dissertação (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

SOUZA, U. E. L. **Projeto e implementação do canteiro**. 1. Ed. São Paulo: O nome da rosa, 2000. 96p.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia de recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998. 255p.

WERLE, A. P., KAZMIERCZAK, C. S., KULAKOWSKI, M. P. *et al.* Carbonatatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Ambiente construído**: Porto Alegre, v. XXI, n.2, p. 213-228, 2011.

## APÊNDICE

Resultados de resistência média à compressão CPs prismáticos e cilíndricos, indicando seu desvio padrão.

Tipo de amostra:		cilíndrico			prismático	cilíndrico			prismático
Traço	adição de fibras (%)	7	14	28	28 dias	7 dias	14 dias	28 dias	28 dias
Resistência (MPa)					Desvio padrão (MPa)				
Traço 0	0	25,8	29,4	33,3	4,1	1,1	1,4	0,9	0,2
Traço 1	0,1	28,2	31,6	35,6	4,4	0,9	0,6	1,6	0,1
Traço 2	0,5	26,0	29,0	33,4	3,8	0,8	0,7	1,2	0,3
Traço 3	1	26,8	30,1	32,7	3,2	1,1	0,4	1,0	0,2

Fonte: do Autor (2020).

Resultados de resistência média à compressão e desvio padrão dos CPs cilíndricos carbonatados.

Tipo de amostra:		Resistência (MPa)			Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
Traço	adição de fibras (%)					
0	0	29,84	29,32	31,60	30,2	0,9
1	0,1	31,05	31,13	33,07	31,7	0,9
2	0,5	30,54	30,42	31,75	30,9	0,6
3	1	31,71	30,93	29,64	30,7	0,7

Fonte: do Autor (2020).

Valores obtidos em ensaio de absorção por imersão:

Identificação do traço	Massa do CP seco (g)				Massa do CP saturado superfície seca (g)				Massa do CP imerso (g)			
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
a	3754,3	3763,6	3780,5	3772,1	3863,3	3985,6	4060,2	3945,8	2202,2	2324,2	2371,0	2264,8
b	3683,0	3736,3	3610,2	3761,1	3867,6	3878,2	3859,4	3935,2	2224,6	2226,5	2250,4	2271,2
c	3763,8	3743,8	3826,2	3921,4	3929,0	3963,9	4055,5	4122,3	2266,9	2311,4	2375,5	2402,9

Fonte: do Autor (2020).

Valores calculados em ensaio de absorção por imersão:

Identificação do traço	Resistência (MPa)				Absorção de água				Índice de vazios			
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
a	31,66	28,90	25,72	27,25	2,90%	5,90%	7,40%	4,60%	6,56%	13,36%	16,56%	10,33%
b	25,12	29,70	25,89	27,68	5,01%	3,80%	6,90%	4,63%	11,24%	8,59%	15,49%	10,46%
c	28,95	29,00	26,07	26,56	4,39%	5,88%	5,99%	5,12%	9,94%	13,32%	13,65%	11,68%

Fonte: do Autor (2020).

Valores obtidos em ensaio de absorção por imersão das amostras carbonatadas:

Identificação do traço	Massa do CP seco (g)				Massa do CP saturado superfície seca (g)				Massa do CP imerso (g)			
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
a	3715,5	3805,3	3673,3	3640,9	3928,8	3969,9	3880,5	3926,9	2150,6	2108,3	2310,5	2287,1
b	3623,7	3617,3	3714,4	3692,2	3855,9	3847,0	3935,6	3978,4	2253,4	2240,7	2350,4	2315,0
c	3771,9	3675,4	3612,0	3336,5	3934,5	3870,0	3830,3	3605,0	2291,8	2245,9	2270,7	2095,0

Fonte: do Autor (2020).

Valores calculados em ensaio de absorção por imersão das amostras carbonatadas:

Identificação do traço	Resistência (MPa)				Absorção de água				Índice de vazios			
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
Identificação do CP												
a	26,02	28,7	27,93	24,21	5,74%	4,33%	5,64%	7,86%	12,00%	8,84%	13,20%	17,44%
b	24,3	27,2	27,52	24,74	6,41%	6,35%	5,96%	7,75%	14,49%	14,30%	13,95%	17,21%
c	27,4	27,43	27,61	25,39	4,31%	5,29%	6,04%	8,05%	9,90%	11,98%	14,00%	17,78%

Fonte: do Autor (2020).